



**Escola Politècnica Superior  
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# **TRABAJO FINAL DE GRADO**

---

**TÍTULO: DISEÑO DE UN SIMULADOR PASIVO DE PULMÓN PARA  
UN RESPIRADOR MECÁNICO**

**AUTORES: CÁRDENAS REZABALA, BRIAN GUILLERMO  
ISLA VALDANZO, RAÚL**

**FECHA: Julio, 2016**

<b>APELLIDOS: CÁRDENAS REZABALA</b>	<b>NOMBRE: BRIAN</b>
<b>GUILLERMO</b>	
<b>TITULACIÓN: GRADUADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>	
<b>PLAN: GRADO</b>	
<b>DIRECTOR: HERNÁN ALBERTO GONZÁLEZ ROJAS</b>	
<b>DEPARTAMENTO: 712 - INGENIERÍA MECÁNICA</b>	

<b>APELLIDOS: ISLA VALDANZO</b>	<b>NOMBRE: RAÚL</b>
<b>TITULACIÓN: GRADUADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>	
<b>PLAN: GRADO</b>	
<b>DIRECTOR: HERNÁN ALBERTO GONZÁLEZ ROJAS</b>	
<b>DEPARTAMENTO: 712 - INGENIERÍA MECÁNICA</b>	

## RESUMEN

Una de las principales limitaciones en la docencia de la ventilación mecánica es la falta de automatización de las distintas funciones en los simuladores de pulmón pasivos, obligando a realizar los cambios necesarios para la simulación a la vista de los alumnos.

Es por esto que el presente proyecto pretende diseñar y fabricar un simulador pasivo de pulmón para un respirador mecánico en el cual se pueda automatizar la variación de la compliancia pulmonar, siguiendo el ciclo del proceso para el diseño que empieza por el reconocimiento de la necesidad y termina con la fabricación del simulador, pasando por el diseño, rediseño y automatización del mismo.

Paralelamente se realizará el diseño de una válvula lineal de caudal de aire capaz de reproducir la vía aérea del aparato respiratorio para simular resistencias en el flujo de aire.

### Palabras clave (máximo 10):

Ventilación mecánica	Docencia	Simulador de pulmón	Automatización
Compliancia pulmonar	Válvula lineal	Resistencia	

## ABSTRACT

One of the major limitations in the teaching of mechanical ventilation is the lack of automation of various functions in passive lung simulators, forcing various changes which are necessary for the simulation taking into consideration the students.

That is why this project aims to design and manufacture a passive lung simulator for a mechanical respirator which can automate the change in lung compliance, following the cycle of the design process which begins with the recognition of the need, and ends with making the simulator through design, redesign and the automation of the same.

In parallel, the design of a linear air flow valve capable of the reproducing the airway respiratory will be made to simulate resistance in the air flow.

### keywords (10 maximum):

Mechanical ventilation	Teaching	Lung simulator	Automating
Lung compliance	Linear valve	Resistance	

## APORTACIÓN INDIVIDUAL AL GRUPO

La mayor parte del proyecto ha sido repartida equitativamente entre los dos integrantes que formamos el grupo, como la realización del diseño y modelado en 3D del simulador, y la redacción de los puntos que forman la memoria. Además los dos somos Técnicos Superiores en Fabricación Mecánica, por lo que en la fase de fabricación de los prototipos, las diferentes fases de la mecanización fueron repartidas.

### **BRIAN G. CÁRDENAS REZABALA**

Como aporte individual puedo destacar las siguientes partes del proyecto:

**Introducción:** *Realización de los objetivos, alcance y estudio de mercado.*

**Primer bloque:** *Realización de los planos del mecanismo.*

**Segundo bloque:** *Búsqueda de los componentes electrónicos necesarios.*

**Tercer bloque:** *Diseño de la válvula y planos.*

### **RAÚL ISLA VALDANZO**

Como aporte individual puedo destacar las siguientes partes del proyecto:

**Introducción:** *Realización del estado del arte (introducción a la ventilación mecánica, compliancia y resistencia).*

**Primer bloque:** *Realización de las fichas de fabricación del mecanismo.*

**Segundo bloque:** *Diseño del circuito y programa para controlar el simulador.*

**Tercer bloque:** *Realización de las fichas de fabricación de la válvula.*

## Índice

1. Introducción .....	15
1.1 Objetivo.....	16
1.2 Alcance.....	17
1.3 Estado del arte .....	18
1.3.1 Introducción a la Ventilación Mecánica.....	18
1.3.2 Compliancia .....	31
1.3.3 Resistencia.....	34
1.4 Estudio de los equipos existentes .....	35
2. Primer Bloque: Diseño y fabricación del mecanismo .....	37
2.1 Diseño del mecanismo .....	37
2.1.1 Desarrollo del modelo 3D .....	44
2.1.2 Selección de materiales .....	55
2.2 Fabricación del mecanismo .....	56
2.2.1 Definición de maquinaria a utilizar .....	56
2.2.2 Establecimiento parámetros de corte.....	58
2.2.3 Mecanizado .....	64
2.3 Evaluación del mecanismo .....	70
2.4 Rediseño .....	71
2.4.1 Mecanizado .....	74
2.5 Evaluación 2 del mecanismo.....	76
3. Segundo Bloque: Automatización del mecanismo.....	77
3.1 Propuesta de automatización.....	77
3.2 Definir componentes .....	81
4. Tercer Bloque: Diseño y fabricación de una válvula lineal de caudal de aire.....	85
4.1 Diseño de la válvula .....	85
4.1.1 Desarrollo del modelo 3D .....	89
4.2 Fabricación de la válvula.....	92
4.2.1 Mecanizado .....	92
4.2.2 Montaje .....	94
5. Análisis del ciclo de vida .....	97
5.1 Actores implicados.....	97
5.1.1 Identificación de los actores implicados .....	97

5.1.2 Intereses de los actores implicados .....	98
5.2 Puntos calientes .....	100
5.2.1 Diseño y fabricación.....	101
5.2.2 Cadena de suministros.....	101
5.2.3 Medio ambiente y energía .....	109
5.2.4 Regulación, legislación .....	112
5.2.5 Económicos .....	113
5.2.6 Sociedad .....	113
5.3 Integración en los tres capitales: Ambiental, Económico y Humano.....	114
6. Presupuesto .....	118
6.1 Costes del proyecto .....	118
6.2 Análisis de la inversión .....	120
7. Conclusiones .....	122
8. Agradecimientos .....	123
9. Bibliografía .....	124
Anexo A. Planos Mecanismo (diseño 1 y 2).....	127
Anexo B. Hojas de procesos Mecanismo (diseño 1 y 2).....	127
Anexo C. Planos Válvula .....	127
Anexo D. Hojas de procesos Válvula.....	127

## Sumario de figuras

<b>Figura 1.1.</b> Diagrama de flujo para el diseño y fabricación del simulador	15
<b>Figura 1.3.1.1.</b> Dueñas, C., Ortiz, G. y González, M. (2009). Ventilación con presión positiva y ventilación espontánea en curva a presión-tiempo.(Gráfico pág. 29). [1].	20
<b>Figura 1.3.1.2.</b> Dueñas, C., Ortiz, G. y González, M. (2009). Presión vs. tiempo.(Gráfico pág. 30). [1].	21
<b>Figura 1.3.1.3.</b> Dueñas, C., Ortiz, G. y González, M. (2009). VASCY espontánea en IMV.(Gráfico pág. 32). [1].	21
<b>Figura 1.3.1.4.</b> Dueñas, C., Ortiz, G. y González, M. (2009). Curva a presión-tiempo en PSV. (Gráfico pág. 33). [1].	22
<b>Figura 1.3.1.5.</b> Dueñas, C., Ortiz, G. y González, M. (2009). CPAP. (Gráfico pág. 34). [1].	22
<b>Figura 1.3.1.6.</b> Dueñas, C., Ortiz, G. y González, M. (2009). Efecto en el cambio de la distensibilidad en la relaciones fuerza-distancia y en presión-volumen. (Gráfico pág. 64 y 65). [1].	24
<b>Figura 1.3.1.7.</b> Dueñas, C., Ortiz, G. y González, M. (2009). Unidades de medida. (Imagen pág. 70). [1].	26
<b>Figura 1.3.1.8.</b> Dueñas, C., Ortiz, G. y González, M. (2009). Fórmulas y gráfica de resistencia con flujo laminar. (Imagen pág. 71). [1].	28
<b>Figura 1.3.1.9.</b> Dueñas, C., Ortiz, G. y González, M. (2009). Fórmulas y gráfica de resistencia con flujo turbulento. (Imagen pág. 71). [1].	29
<b>Figura 1.3.1.10.</b> Dueñas, C., Ortiz, G. y González, M. (2009). Comparación de las curvas P-V dinámica y estáticas. La línea gruesa representa la curva casi estática, las líneas delgadas representan curvas contraídas. (Gráfico pág. 204). [1].	30
<b>Figura 1.3.2.1.</b> Dueñas, C., Ortiz, G. y González, M. (2009). Curva P-V en sujetos sanos y en síndrome de dificultad respiratoria. TLC, capacidad pulmonar; FRC, capacidad residual funcional; RV, volumen residual. (Gráfico pág. 206). [1].	33
<b>Figura 1.4.1.</b> Simulador pasivo de pulmón Siemens Maquet Test Lung 190. Siemens Maquet Adult 1 Liter Ventilator Test Lung 190 #6006832. [Imagen]. Recuperado de <a href="http://www.mspinc.com/siemens-adult-1liter-test-lung-190-6006832">http://www.mspinc.com/siemens-adult-1liter-test-lung-190-6006832</a>	35



<b>Figura 1.4.2.</b> Simulador pasivo de pulmón LS-2000 (versión para adultos y pediátrica). [Imagen] Recuperado de <a href="http://www.bcgroupestore.com/BC-Biomedical-Lung-Simulator-Series--C84.aspx">http://www.bcgroupestore.com/BC-Biomedical-Lung-Simulator-Series--C84.aspx</a>	36
<b>Figura 2.1.1.</b> Detalle del sistema de ajuste de compliancia del simulador LS-2000. [Imagen]. Recuperado de <a href="http://www.bcgroupestore.com/BC-Biomedical-Lung-Simulator-Series--C84.aspx">http://www.bcgroupestore.com/BC-Biomedical-Lung-Simulator-Series--C84.aspx</a>	37
<b>Figura 2.1.2.</b> Motor eléctrico y surtido de engranajes. [Imágenes]. Recuperado de <a href="http://www.diotronic.com/">www.diotronic.com/</a>	38
<b>Figura 2.1.3.</b> Boceto de los rodillos y esquema del acople al mecanismo.	39
<b>Figura 2.1.4.</b> Mecanismo piñón-cremallera. [Imagen]. Recuperado de <a href="http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio//1000/1102/html/1_pincremallera.html">http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio//1000/1102/html/1_pincremallera.html</a>	40
<b>Figura 2.1.5.</b> Primer boceto con mecanismo piñón-cremallera.	40
<b>Figura 2.1.6.</b> Mecanismo husillo-tuerca.[Imagen]. Recuperado de <a href="http://es.calameo.com/read/00465364470f3ebd1e116">http://es.calameo.com/read/00465364470f3ebd1e116</a>	41
<b>Figura 2.1.7.</b> Segundo boceto con mecanismo husillo-tuerca.	41
<b>Figura 2.1.8.</b> Esquema de la transmisión del movimiento (vista en planta).	41
<b>Figura 2.1.9.</b> Boceto de la estructura del simulador.	43
<b>Figura 2.1.10.</b> Detalle de la parte inferior del pulmón Maquet.[Imagen]. Recuperado de <a href="http://stores.ventilatorsplus.com/6006832-Test-Lung-Adult-190-1Liter-Maquet_p_151.html">http://stores.ventilatorsplus.com/6006832-Test-Lung-Adult-190-1Liter-Maquet_p_151.html</a>	43
<b>Figura 2.1.1.1.</b> Pulmón Maquet y su modelo en 3D.	45
<b>Figura 2.1.1.2.</b> Plano del alzado y perfil del Pulmón Maquet.	45
<b>Figura 2.1.1.3.</b> Motor reductor y su modelo en 3D.	46
<b>Figura 2.1.1.4.</b> Plano del alzado y perfil del Motor reductor.	46
<b>Figura 2.1.1.5.</b> Vista en isométrico y detalle de un corte de la estructura.	47
<b>Figura 2.1.1.6.</b> Detalle de la base inferior de la estructura.	48
<b>Figura 2.1.1.7.</b> Detalle de la base motor de la estructura.	48
<b>Figura 2.1.1.8.</b> Detalle del tubo y la varilla roscada.	49

<b>Figura 2.1.1.9.</b> Vistas del subconjunto mecanismo.	49
<b>Figura 2.1.1.10.</b> Vistas del acople para el tornillo sin fin.	50
<b>Figura 2.1.1.11.</b> Detalle de los sistemas de fijación.	51
<b>Figura 2.1.1.12.</b> Detalle de los casquillos.	51
<b>Figura 2.1.1.13.</b> Subconjunto rodillos.	52
<b>Figura 2.1.1.14.</b> Vista seccionada de los rodillos.	52
<b>Figura 2.1.1.15.</b> Tuerca deslizable.	53
<b>Figura 2.1.1.16.</b> Escuadras y pasadores de sujeción.	53
<b>Figura 2.1.1.17.</b> Ensamblaje final con y sin pulmón.	54
<b>Figura 2.1.1.18.</b> Alzado y perfil del ensamblaje final.	54
<b>Figura 2.2.1.1.</b> Esquema de máquinas a utilizar.	56
<b>Figura 2.2.1.2.</b> Torno paralelo.	56
<b>Figura 2.2.1.3.</b> Amoladora y sierra.	57
<b>Figura 2.2.1.4.</b> Taladro de columna, sierra de cinta y lijadora de banda.	57
<b>Figura 2.2.3.1.</b> Detalle del mecanizado de nylon.	64
<b>Figura 2.2.3.2.</b> Cilindrado en torno. [Imagen]. Recuperado de <a href="http://maquinasyherramientassimples.blogspot.com.es/2013/04/el-torno.html">http://maquinasyherramientassimples.blogspot.com.es/2013/04/el-torno.html</a>	65
<b>Figura 2.2.3.3.</b> Pasador y tapa del pasador para sujetar el pulmón.	65
<b>Figura 2.2.3.4.</b> Pasador Escuadras para fijar sujetar el pulmón.	65
<b>Figura 2.2.3.5.</b> Agujeros en el pulmón Maquet por donde los pasadores y las escuadras sujetarán y fijarán el pulmón a la estructura.	66
<b>Figura 2.2.3.6.</b> Obertura en la madera contrachapada por donde se introduce, centra y fija el pulmón.	66
<b>Figura 2.2.3.7.</b> Casquillo guía de varillas.	67
<b>Figura 2.2.3.8.</b> Rodillos y sus componentes del subconjunto.	67
<b>Figura 2.2.3.9.</b> Tuerca deslizable en la varilla roscada. Detalle del roscado interior de la tuerca deslizable.	68

<b>Figura 2.2.3.10.</b> Mecanizado de la tuerca deslizable, cilindrado exterior.	68
<b>Figura 2.2.3.11.</b> Técnicos realizando el mecanizado de las piezas de torno.	69
<b>Figura 2.2.3.12.</b> Acople introducido en eje de salida del motor.	69
<b>Figura 2.2.3.13.</b> Acople con salida hacia tornillo sin fin.	69
<b>Figura 2.3.1.</b> Prototipo resultante del primer diseño.	70
<b>Figura 2.4.1.</b> Nuevo montaje con los nuevos componentes.	71
<b>Figura 2.4.2.</b> Fotografía del motor utilizado en el rediseño. Imagen CAD 3D del motor.	72
<b>Figura 2.4.3.</b> Rediseño tuerca deslizable.	73
<b>Figura 2.4.1.1.</b> Rediseño tuerca deslizable.	74
<b>Figura 2.4.1.2.</b> Casquillo para dar altura a la rueda dentada.	75
<b>Figura 2.4.1.3.</b> Elevación de madera para motor (2).	75
<b>Figura 2.5.1.</b> Prototipo obtenido del rediseño.	76
<b>Figura 3.1.1.</b> Simulador Maquet.	77
<b>Figura 3.1.2.</b> Simulador Maquet. Detalle del globo interior.	78
<b>Figura 3.1.3.</b> Estimación del globo en 3D.	78
<b>Figura 3.1.4.</b> Globo con volúmenes diferentes.	79
<b>Figura 3.1.5.</b> (a) Posición con volumen mínimo. (b) Posición intermedia de volumen. (c) Posición con máximo volumen del globo.	80
<b>Figura 3.1.6.</b> Máxima expansión del globo.	81
<b>Figura 3.2.1.</b> Placa Arduino. [Imagen]. Recuperado de <a href="http://www.electronicaestudio.com/arduino_productos.htm">http://www.electronicaestudio.com/arduino_productos.htm</a>	82
<b>Figura 3.2.2.</b> Esquema Arduino. [Imagen]. Recuperado de <a href="http://playground.arduino.cc/Main/AdafruitMotorShield">http://playground.arduino.cc/Main/AdafruitMotorShield</a>	83
<b>Figura 3.2.3.</b> Controlador. [Imagen]. Recuperado de <a href="http://playground.arduino.cc/Main/AdafruitMotorShield">http://playground.arduino.cc/Main/AdafruitMotorShield</a>	83
<b>Figura 3.2.4.</b> Diagrama del driver. [Imagen]. Recuperado de <a href="http://www.electronicoscaldas.com/datasheet/L293D-L293DD_ST.pdf">[http://www.electronicoscaldas.com/datasheet/L293D-L293DD_ST.pdf]</a>	84

<b>Figura 3.2.5.</b> Final de carrera utilizado. Representación CAD 3D del final de carrera.	84
<b>Figura 4.1.1.</b> Vista esquemática de la válvula del artículo "CCR".[Imagen]. Recuperado de Verbraak, A., Holland, W., Mulder, B., Bogaard, J. and Versprille, A. (1999). Computer-controlled flow resistance. <i>Medical &amp; Biological Engineering &amp; Computing</i> , 37(6), pp.770-775.	85
<b>Figura 4.1.2.</b> Esquema de la entrada y salida del flujo de aire para la válvula.	86
<b>Figura 4.1.3.</b> Primer boceto de los componentes de la válvula.	86
<b>Figura 4.1.4.</b> Boceto final con los componentes de la válvula.	87
<b>Figura 4.1.5.</b> Diseño de una ranura para estanqueidad neumática con movimiento axial [Imagen]. Recuperado de Apuntes JUNTES TÓRIQUES 2015. Asignatura EXG2-EPSEVG).	88
<b>Figura 4.1.1.1.</b> Imagen 3D del modelado del cilindro.	89
<b>Figura 4.1.1.2.</b> Imagen 3D del modelado del manguito.	89
<b>Figura 4.1.1.3.</b> Imagen 3D del modelado de la tapa - manguito.	90
<b>Figura 4.1.1.4.</b> Imagen 3D del modelado de válvula y sección mostrando el espacio de 0.25mm entre el cilindro y el manguito.	90
<b>Figura 4.1.1.5.</b> Sección de la válvula en posición cerrada y abierta.	91
<b>Figura 4.2.1.1.</b> Mecanizado del cilindro.	92
<b>Figura 4.2.1.2.</b> Mecanizado de los diámetros interiores.	93
<b>Figura 4.2.1.3.</b> Mecanizado de la tapa del manguito.	93
<b>Figura 4.2.2.1.</b> Montaje del prototipo de la válvula lineal de aire.	94
<b>Figura 4.2.2.2.</b> Válvula cerrada.	95
<b>Figura 4.2.2.3.</b> Válvula abierta.	95
<b>Figura 4.2.2.4.</b> Válvula en una posición intermedia.	96
<b>Figura 5.1.1.1</b> Cadena de producción y fin de vida del simulador.	97

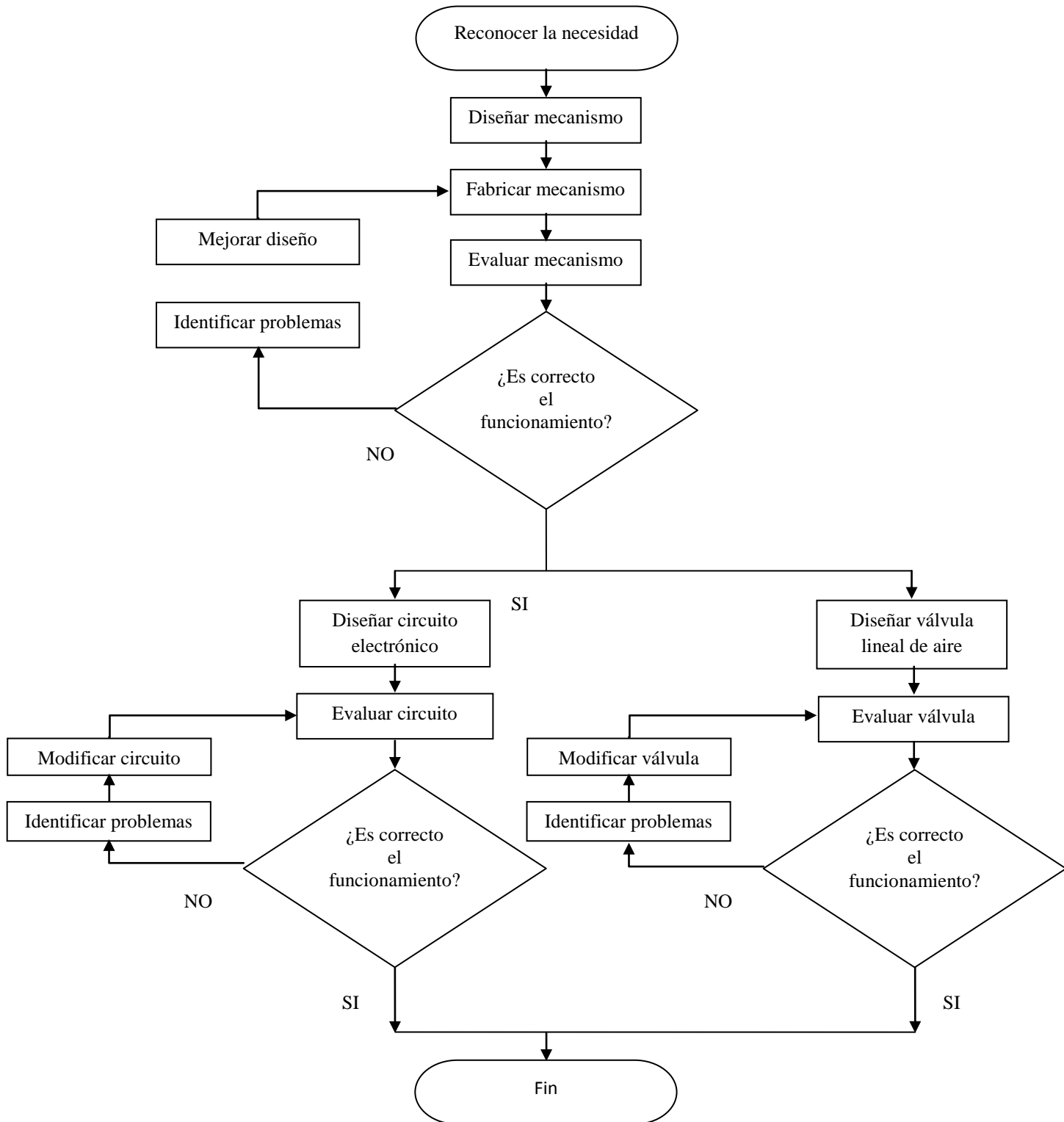
<b>Figura 5.1.1.2</b> Cantidad de consumidores potenciales en España.	98
<b>Figura 5.1.2.1.</b> Gráfico de relevancia de actores implicados vs importancia fabricación del producto.	99
<b>Figura 5.2.1.</b> Aspectos a analizar en el simulador pasivo de pulmón.	100
<b>Figura 5.2.1.1.</b> Gráfico creado con CES Edupack.	101
<b>Figura 5.2.2.1</b> Producción mundial de plásticos en 2012 [Gráfico]. Recuperado de <a href="http://www.plasticseurope.org/documents/document/20150227150049-final_plastics_the_facts_2014_2015_260215.pdf">http://www.plasticseurope.org/documents/document/20150227150049-final_plastics_the_facts_2014_2015_260215.pdf</a>	102
<b>Figure 5.2.2.2</b> Demanda europea de plásticos por sector y tipo de polímero 2014 [Gráfico]. <a href="http://www.plasticseurope.org/documents/document/20150227150049-final_plastics_the_facts_2014_2015_260215.pdf">http://www.plasticseurope.org/documents/document/20150227150049-final_plastics_the_facts_2014_2015_260215.pdf</a>	102
<b>Figura 5.2.2.3</b> Información sobre el reciclaje [Imagen CES Edupack]	103
<b>Figura 5.2.2.4.</b> Productores de acero (%).	104
<b>Figura 5.2.2.5.</b> Información del reciclaje del acero [Imagen CES Edupack].	104
<b>Figura 5.2.2.6.</b> Productores aluminio (%).	106
<b>Figura 5.2.2.7.</b> Información sobre reciclaje del aluminio [Imagen de CES Edupack]	106
<b>Figura 5.2.2.8.</b> Producción paneles de madera [Gráfico]. Recuperado de <a href="http://www.fao.org/forestry/44134-01f63334f207ac6e086bfe48fe7c7e986.pdf">http://www.fao.org/forestry/44134-01f63334f207ac6e086bfe48fe7c7e986.pdf</a>	107
<b>Figure 5.2.2.9.</b> Información reciclaje de madera contrachapada [Imagen de CES Edupack].	108
<b>Figura 5.2.2.10.</b> Reservas de materiales [Gráfico de CES Edupack].	108
<b>Figura 5.2.3.1</b> Componentes (materiales, fabricación y final de ciclo de vida).[Imagen de CES Edupack]	109
<b>Figura 5.2.3.2.</b> Energía necesitada para producir el simulador. [Gráfico de EduPack-Eco Audit tool]	110
<b>Figura 5.2.3.3.</b> Emisiones de CO <sub>2</sub> para producir el simulador. [Gráfico de EduPack-Eco Audit tool]	111
<b>Figura 5.2.3.4</b> Análisis del coste. [Gráfico de EduPack-Eco Audit tool]	111

## Sumario de tablas

Tabla	pág.
<b>Tabla 2.1.1:</b> Velocidad de giro del motor en función de la tensión aplicada.	38
<b>Tabla 2.1.2:</b> Relaciones de transmisión.	44
<b>Tabla 2.1.2.1:</b> Lista de materiales a utilizar.	55
<b>Tabla 2.2.1.1:</b> Operaciones y herramientas que se usarán según la maquinaria	58
<b>Tabla 2.2.2.1:</b> Valores de la velocidad de corte usando brocas de HSS.	61
<b>Tabla 2.2.2.2:</b> Valores de la velocidad de corte para cilindrado y refrentado (torno)	61
<b>Tabla 2.2.2.3:</b> Velocidad de corte para ranurado (torno)	61
<b>Tabla 2.2.2.4:</b> Valores para calcular la fec	62
<b>Tabla 2.2.2.5:</b> Potencias de máquinas	63
<b>Tabla 2.4.1:</b> Velocidad de giro del motor en función de la tensión aplicada.	72
<b>Tabla 2.4.2:</b> Relaciones de transmisión con nuevos componentes.	73
<b>Tabla 3.1</b> Relación de posiciones con volúmenes	80
<b>Tabla 4.1.1:</b> Tabla con las medidas para el diseño de la ranura ( <i>Fuente: Apuntes JUNTES TÓRIQUES. Asignatura EXG2-EPSEVG</i> ).	88
<b>Tabla 5.1.2.1:</b> Actores implicados y sus intereses.	98
<b>Tabla 5.2.2.1</b> Producción de acero.	103
<b>Tabla.5.2.2.2</b> Producción de aluminio.	115
<b>Tabla 5.3.1.</b> Matriz de la integración de los tres capitales.	114
<b>Tabla 6.1</b> Materiales y componentes eléctricos.	118

## 1. Introducción

Mediante el uso de un diagrama de flujo se explicarán los pasos a seguir para realizar el diseño y fabricación del simulador pasivo de pulmón (Figura 1.1).



**Figura 1.1.** Diagrama de flujo para el diseño y fabricación del simulador.

## 1.1 Objetivo

El objetivo del proyecto es realizar el diseño y fabricación de un simulador pasivo de pulmón para un respirador mecánico. Para ello se dividirá en diferentes bloques siguiendo el diagrama de flujo mostrado en la figura anterior (Figura 1.1).

Por lo que en cada bloque se establecerán los siguientes objetivos:

- Primer bloque: Diseñar y fabricar un mecanismo para simular la variación de la compliancia.
- Segundo bloque: Diseñar un circuito electrónico para automatizar el movimiento del mecanismo realizado en el primer bloque.
- Tercer bloque: Diseñar una válvula lineal de caudal de aire.

Una vez completados los objetivos principales del proyecto, se realizará un análisis del ciclo de vida del simulador, para determinar si es un producto sostenible.



## **1.2 Alcance**

En el desarrollo del proyecto, dividido en tres bloques, se realizará:

### Mecanismo para la variación de la compliancia pulmonar

- Con el uso de herramientas CAD se realizará el diseño de un mecanismo capaz de simular la variación de la compliancia pulmonar.
- Fabricación de los diferentes componentes del mecanismo para evaluar su comportamiento.
- Si es necesario, después de probar y evaluar el mecanismo, proponer un rediseño y fabricación del mismo.

### Automatización del mecanismo

- Definición de los parámetros a controlar.
- Condiciones que deben cumplir los controladores.
- Búsqueda de los componentes electrónicos necesarios.

### Válvula lineal de caudal de aire

- Diseño de una válvula lineal de caudal de aire con herramientas CAD.

Una vez realizados los tres bloques se determinará si el simulador es un producto sostenible utilizando el software CES Edupack.

Finalmente se calculará el coste del simulador teniendo en cuenta las horas de ingeniería, taller y los materiales, para posteriormente hacer un análisis de la inversión.

### **1.3 Estado del arte**

Antes de empezar a realizar los diferentes bloques es necesario conocer la base teórica sobre la cual se sustenta el escrito, haciendo un repaso de las técnicas relacionadas con el proyecto. Para ello se realizará una introducción a la ventilación mecánica y se explicarán las condiciones fisiológicas que se simularán (compliancia y resistencia).

#### **1.3.1 Introducción a la Ventilación Mecánica**

Es evidente que la capacidad de respirar es una función determinante y característica de todos los seres vivos. Siempre que alguno de los procesos fisiológicos asociados a la respiración falle, la vida se verá seriamente comprometida. La respiración, sin embargo, va más allá del movimiento de aire en las estructuras pulmonares, implica fundamentalmente la posibilidad de refrescar el aire de los alvéolos para que el intercambio de gases ocurra con la sangre de acuerdo a las necesidades de los diferentes órganos y sistemas, y es denominada respiración externa. Sin embargo, los químicos, bioquímicos y fisiólogos están familiarizados con un paso más íntimo en los procesos respiratorios, se trata del uso y producción de los gases que manejan los pulmones durante la actividad metabólica vital, y es a lo que se denomina respiración interna. Los fenómenos respiratorios externos deben estar acoplados a las demandas de la respiración interna.

La ventilación mecánica se realiza con un equipo externo, que permite asegurar el intercambio de gases respiratorios en los pulmones de un paciente que por sí solo es incapaz de satisfacer sus demandas presentes o inmediatas. Fisiológicamente puede describirse como un aparato que por diferentes medios proporciona una presión suficiente para sobrepasar las resistencias al flujo aéreo y vencer las propiedades elásticas tanto del pulmón como de la caja torácica.

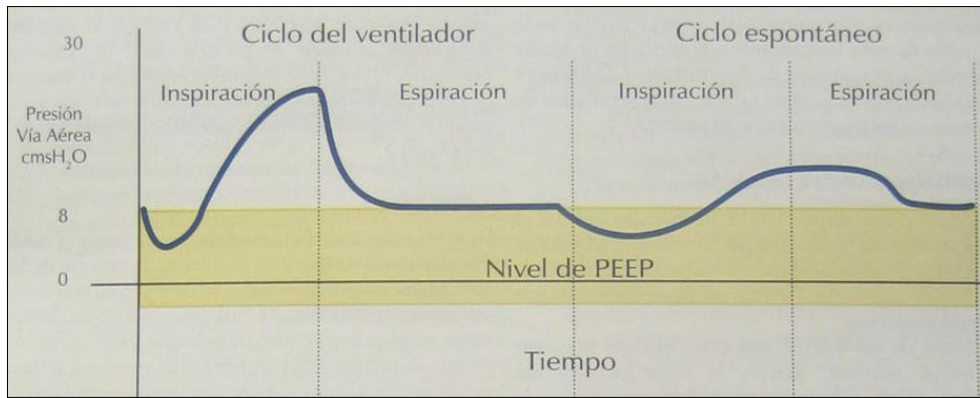
En términos resumidos, los ventiladores son máquinas que simplemente hacen el trabajo que no pueden hacer los músculos inspiratorios (ventilación del paciente) además de ofrecerle al clínico herramientas para mejorar la oxigenación del paciente. Los ventiladores son una poderosa herramienta que le da al especialista tiempo cuando el paciente ya no lo tiene desde el punto de visto respiratorio.

### **Modos de Ventilación**

La administración de soporte ventilatorio busca dar el apoyo que el paciente requiere mientras se resuelven las alteraciones del sistema respiratorio que lo llevaron a la falla, cualquiera que sea su causa primaria. Éstas pueden tener diferentes grados de severidad, y por lo tanto requerirán diferentes niveles de soporte que puede ser total o parcial. Con base en lo anterior se programará el ventilador con unos parámetros determinados, y es la combinación de los mismos la que establece la manera como el ventilador entrega esta ayuda, siendo esto lo que conocemos como modos ventilatorios.

### **Variables de fase**

- Disparo: Es la variable que permite el inicio de la inspiración, es decir el cambio de fase espiratoria a inspiratoria.
- Sensibilidad: El nivel de disminución de presión o flujo requerido para que el esfuerzo del paciente pueda disparar el ventilador.
- Límite: Es la variable que detiene la inspiración al alcanzar un valor predeterminado y mantenerlo durante la misma.
  - Límite por presión. Cuando se programa un valor de presión que una vez alcanzado detiene la entrada de gas.
  - Límite por volumen. Cuando se establece un volumen corriente prefijado, y una vez alcanzado detiene la inspiración.
  - Límite por flujo. Si se alcanza un valor máximo de flujo.
- Ciclado. Es la variable que termina la inspiración, y permite la apertura de la válvula espiratoria para que, de manera pasiva, comience el flujo espiratorio.
- Pausa inspiratoria. Corresponde a un lapso de tiempo en el cual ya no hay flujo inspiratorio, y la válvula espiratoria permanece cerrada.
- Variable de base. Es el parámetro controlado durante la espiración. El más utilizado es la presión, y corresponde al PEEP (positive and expiratory pressure).



**Figura 1.3.1.1.** Ventilación con presión positiva y ventilación espontánea en curva a presión-tiempo.

### **Tipos de respiración**

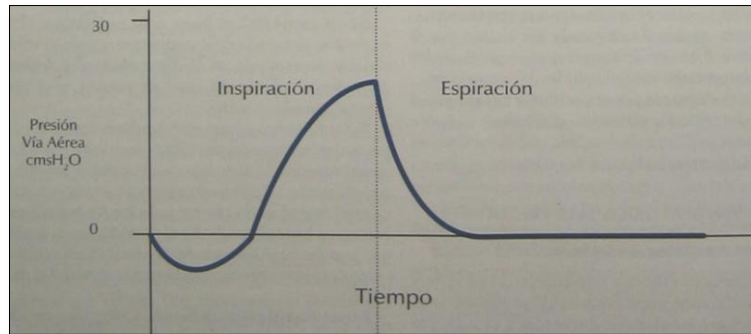
- **Mandatoria:** es aquella disparada y/o ciclada por el ventilador. Para esto utiliza parámetros programados que se deben controlar para cumplir las diferentes fases.
- **Asistida:** es disparada por el paciente y ciclada por el ventilador según los parámetros prefijados.
- **Espontánea:** es disparada y ciclada por el paciente, es decir él determina su frecuencia y duración.

### **Modos ventilatorios más frecuentes**

**Ventilación mecánica controlada (CMV):** Este modo ignora los esfuerzos inspiratorios del paciente, y realiza todo el trabajo respiratorio dando un soporte total, con respiraciones mandatorias disparadas y cicladas por el tiempo, según la frecuencia respiratoria programada por el operador. Existen dos formas de control:

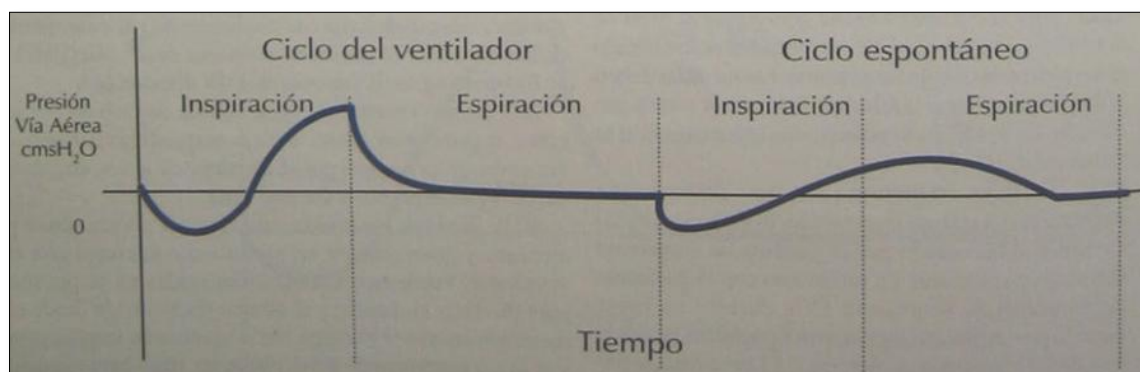
- **Volumen control (VC):** en este caso la variable que limita la inspiración es el volumen, siendo constante en todos los ciclos. Además del volumen se deben programar la frecuencia respiratoria, la relación inspiración/espiración, la fracción inspirada de oxígeno y el nivel de PEEP.
- **Presión control (PC):** el límite aquí es dado por el valor de presión alcanzado en la inspiración, siendo el volumen variable dependiendo de la distensibilidad y resistencia del pulmón, además del nivel presión, y el tiempo inspiratorio seleccionados.

**Ventilación asistida-controlada:** Surge como adaptación del anterior que permite al paciente iniciar la inspiración, por esto requiere seleccionar un nivel de sensibilidad además de los parámetros descritos en el modo controlado. También puede ser controlado por presión o volumen. Dentro de sus ventajas está el no requerir relajación y menor sedación, aunque la superficialidad del paciente puede inducir su principal efecto adverso, la hiperventilación.



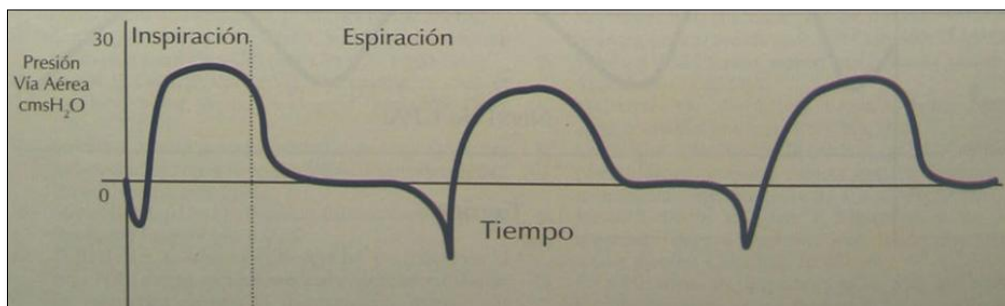
**Figura 1.3.1.2.** Presión vs tiempo.

**Ventilación mandatoria intermitente – ventilación mandatoria intermitente sincronizada (IMV-SIMV):** Surge como producto de las dificultades para proveer un adecuado soporte ventilatorio a los neonatos con síndrome de membrana hialina, permite al paciente respirar de manera espontánea. Pero surgió un nuevo inconveniente, y era que si coincidía una de las respiraciones mandatorias con una espontánea, el paciente recibiría un volumen excesivo, lo que ocasionaba daño al pulmón por baro y volutrauma. Se crea entonces el mecanismo de sincronización, que permite acoplar las respiraciones mandatorias con el esfuerzo del paciente.



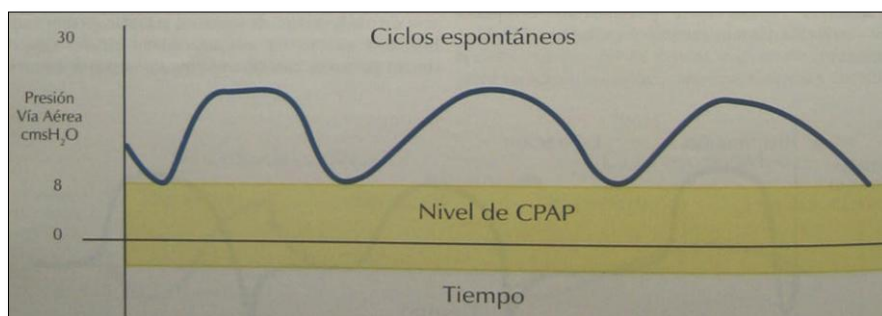
**Figura 1.3.1.3.** SIMV espontánea en IMV.

**Ventilación con soporte de presión (PSV):** esta forma de soporte da una ventilación asistida, que es iniciada siempre por el paciente (disparo), y limitada por el ventilador que provee una presión de gas hasta alcanzar un nivel programado. El ciclado se presenta cuando el flujo cae a menos del 25% del flujo pico logrado. El objetivo de esta presión es ayudar al paciente a vencer la carga impuesta por su sistema respiratorio (pulmones, pared torácica y vía aérea), tubo endotraqueal y circuitos del ventilador, disminuyendo parcial o totalmente el trabajo de los músculos respiratorios dependiendo del grado de presión seleccionado.



**Figura 1.3.1.4.** Curva a presión-tiempo en PSV.

**Presión positiva continua en la vía aérea (CPAP):** el CPAP representa la aplicación de un nivel constante de presión positiva en la vía aérea durante ventilación espontánea ya sea por medio de ventilación mecánica invasiva o no invasiva. Está indicado en aquellos pacientes que requieren mantener la vía aérea artificial por edema, secreciones u obstrucción de otro tipo.



**Figura 1.3.1.5.** CPAP.

### **Fisiología de la respiración**

La fisiología pulmonar comprende áreas relacionadas con circulación o perfusión pulmonar, ventilación alveolar, difusión, transporte, control. Ahora se explicarán brevemente estos procesos:

***Ventilación Alveolar:*** Es el intercambio gaseoso entre los alvéolos y el medio ambiente externo. Es el proceso por medio del cual el oxígeno llega al pulmón desde la atmósfera y el dióxido de carbono de la sangre venosa mezclada de los pulmones es expulsado del cuerpo.

***Ventilación alveolar y dióxido de carbono:*** La concentración del dióxido de carbono del gas alveolar depende de la ventilación alveolar y de la frecuencia con que se produce el dióxido de carbono en el cuerpo. El volumen del dióxido de carbono espirado por unidad de tiempo ( $\dot{V}E_{CO_2}$ ) es igual a la ventilación alveolar (VA) por la concentración fraccional alveolar del  $CO_2$ .

***Flujo sanguíneo pulmonar:*** El pulmón recibe la sangre a través de la circulación bronquial y la circulación pulmonar. El flujo sanguíneo bronquial constituye una pequeña porción del gasto del ventrículo izquierdo y abastece parte del árbol traqueobronquial con sangre arterial sistémica. El flujo sanguíneo pulmonar constituye todo el gasto del ventrículo derecho y abastece al pulmón con sangre venosa mezclada que proviene de todos los tejidos del cuerpo.

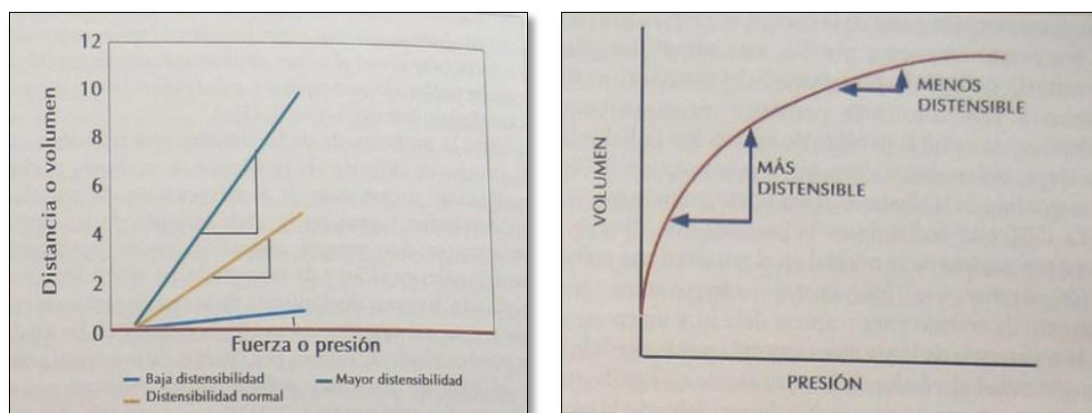
***Interacción de la gravedad y la presión extravascular:*** Bajo presiones alveolares mayores que la presión de la arteria pulmonar en las partes superiores del pulmón, no ocurre flujo sanguíneo en esa región y se le denominó como zona 1. De este modo, cualquier zona 1 está ventilada pero no perfundida, determinando un espacio muerto alveolar (NI). La parte inferior del pulmón se conoce como zona 3. En esta región, la presión de la arteria pulmonar y la presión de la vena pulmonar son ambas superiores a la presión alveolar generando una zona de flujo constante donde la presión de perfusión depende de la diferencia de presiones arterio-venosas. La porción media del pulmón es la zona 2. En esta zona, la presión arterial pulmonar es mayor que la alveolar, pero a su vez esta presión alveolar es mayor que la presión en el lado venoso, en esta sección el flujo no es constante y depende del gradiente arterio-alveolar.

***Relaciones ventilación perfusión:*** El intercambio gaseoso entre los alvéolos y la sangre capilar pulmonar ocurre por difusión. La difusión del oxígeno y del dióxido de carbono ocurre en forma pasiva, dependiendo de su gradiente de concentración a través de la barrera alvéolo-capilar.

**Concepto de desigualdad ventilación-perfusión. Cortocircuito patológico:** Involucra dos unidades importantes:

- *Mezcla venosa:* Determinada por aquellas unidades alveolares mal ventiladas y bien perfundidas. Por ejemplo enfermedades obstructivas. Determinarán relaciones  $V/Q$  con tendencia a cero.
- *Espacio muerto:* Dado por unidades alveolares bien ventiladas pero mal perfundidas: por ejemplo un trombo-embolismo pulmonar. Determinarán relaciones  $V/Q$  con tendencia a infinito.

**Conceptos básicos de mecánica pulmonar:** Cómo la relación presión-volumen de los pulmones y de la caja torácica interactúa para determinar las características de la distensibilidad del sistema respiratorio es quizás uno de los conceptos en fisiología pulmonar de mayor dificultad para su enseñanza. En la espirometría las divisiones pulmonares como la capacidad pulmonar total (CPT), la capacidad residual funcional (CRF) y el volumen residual (VR) han sido enseñadas sólo como definiciones descriptivas. Para un mayor entendimiento de las características presión-volumen del sistema respiratorio, se permite el reemplazo de estas definiciones descriptivas por definiciones funcionales. Por ejemplo; la CRF es el volumen del pulmón, al cual el retroceso elástico de los pulmones y de la pared torácica es iguales en magnitud pero opuestos en dirección. Esta última aproximación tiene como ventaja que ayuda a entender por qué la CRF se ve alterada en algunas patologías como el enfisema y la fibrosis pulmonar, la utilidad clínica de determinar la CRF y las consecuencias graves de un neumotórax.



**Figura 1.3.1.6.** Efecto en el cambio de la distensibilidad en la relaciones fuerza-distancia y en presión-volumen.



### **Principios físicos de la ventilación mecánica**

Desde el punto de vista físico, los ventiladores sólo comprenden cuatro palabras: presión, volumen, tiempo y flujo. Por tanto es importante profundizar en estos términos.

#### ***Concepto de presión:***

Hay dos formas para describir el concepto de presión:

- Presión= Peso específico x altura columna fluido.

$$P = \gamma \cdot h_{mcf} \quad (1.3.1.1)$$

Donde P es la presión,  $\gamma$  es el peso específico y  $h_{mcf}$  la altura en columna de fluido.

- Presión= Fuerza/Área.

$$P = F/A \quad (1.3.1.2)$$

Donde P (MPa) es la presión, F la fuerza (N) y A el área (mm<sup>2</sup>)

La implicación importante de lo anterior, son las unidades de medida que desprenden de cada definición. En la primera definición las unidades de presión son unidades de longitud referidas a un flujo en particular (centímetros de agua, milímetros de mercurio etc.), pero en la segunda definición las unidades serán unidades de fuerza referidas a unidades de área (libras/pulgada cuadrada, etc.).

$\text{PRESIÓN} = \frac{F}{A}$ <p>Para las presiones en el circuito del paciente, se emplean los cm de agua. mmbar y Hpas (hecto pascales) que son aproximadamente iguales</p>	<p>Lbs / pulg<sup>2</sup> (PSI)</p> <p>Kgs / cm<sup>2</sup> (BAR) 1 BAR = 1000 milibares (mbar)</p> <p>Newton / mts<sup>2</sup> (pascal) 1000 pasciales = 1 Kpa</p>
$\text{PRESIÓN} = \text{Pe} \times \text{H}$ <p>Se emplean para medir las presiones de los gases de entrada (O<sub>2</sub>, aire) del ventilador</p>	<p>Centímetros de agua (cm H<sub>2</sub>O)</p> <p>Milímetros de mercurio (mmHg)</p>

**Figura 1.3.1.7.** Unidades de medida.

En la figura 1.3.1.7 se muestran las unidades de presión comúnmente encontradas en ventilación mecánica. La primera definición (F/A) mide altas presiones, que son las que se encuentran en la entrada de gases que requiere el ventilador (entra de oxígeno y aire) y que normalmente son 50 PSI (equivalen a 4 Bar y 343.5 kPa). Con la segunda definición (Pe x H), se miden bajas presiones. En ventilación mecánica no se emplean los milímetros de mercurio sino los cm de H<sub>2</sub>O (que equivalen casi exactamente a 1mbar o a un hPa) para medir las presiones en vía aérea.

### **Concepto de flujo:**

El flujo no es más que la cuantificación de una velocidad volumétrica, es decir, permite determinar a qué velocidad se desplaza un volumen dado. La definición clásica de flujo es:

- Flujo = Volumen / tiempo
- Flujo = área x altura / tiempo
- Flujo = Velocidad x área

Este último concepto permite ver fácilmente que de acuerdo al área de un tubo un mismo volumen viaja a diferentes velocidades, es decir, si se tiene un volumen corriente

de 500 ml, que se desplaza a través de un circuito, en la medida que disminuimos el diámetro del circuito, aumentará la velocidad de desplazamiento de este volumen y si aumentamos el diámetro del circuito disminuirá la velocidad de desplazamiento de estos 500 ml.

El cambio de velocidad en el desplazamiento de un volumen hace que éste modifique su comportamiento durante su recorrido, y por esta modificación es que se conocen los flujos laminares (ordenados en su desplazamiento) y los flujos turbulentos (desordenados en su desplazamiento) tan bien descritos por O. Reynolds.

### ***Concepto de resistencia en flujos:***

Las fuerza que se oponen al flujo, ya sean internas del propio fluido o causadas por el elementos externos como estrechamiento en las mangueras de conducción, codos, es lo que se denominan resistencia en flujos. Si no hay movimiento de un volumen, no tiene sentido hablar de resistencia. La definición de resistencia es simple, basta con saber cuántas unidades de presión se gastan por unidad de flujo, es decir, la resistencia determina el consumo de energía (en unidades de presión) que se produce por el movimiento de un fluido. La definición clásica es la siguiente:

- Resistencia = Presión gastada / flujo =  $P/Q$

$$R = P/Q \quad (1.3.1.3)$$

Las unidades de resistencia serán entonces unidades de presión sobre unidades de flujo. En ventilación mecánica las unidades típicas son:

- $\text{Cm de H}_2\text{O} / \text{Litros} / \text{segundo} = \text{Cm de H}_2\text{O} \cdot \text{segundo} \cdot \text{Lts}^{-1}$

La ley de Hagen-Poiseuille determina la resistencia de flujos en conductos circulares y con régimen laminar.

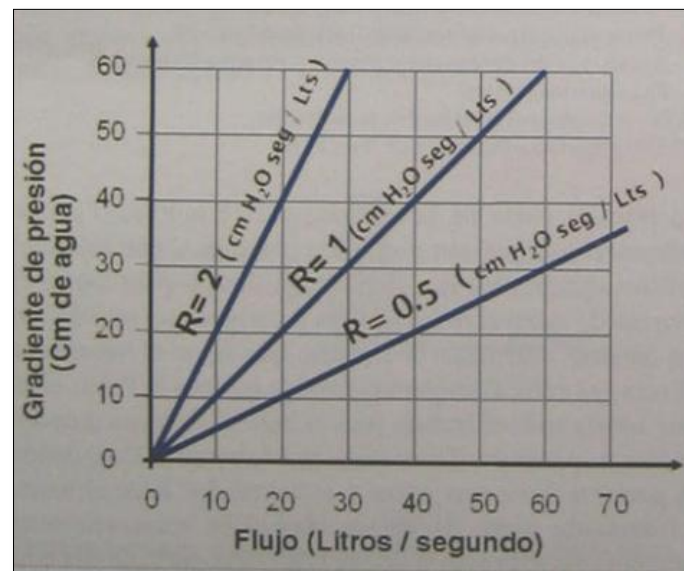
Ley de Hagen-Poiseuille (Hagen 1839 - Poiseuille 1840)

$$\Delta P = \frac{Q 8 n l}{\pi r^4}$$

Q: Flujo  
 $\Delta P$ : Caída de presión  
 n: coef. viscosidad  
 l: longitud  
 r: radio

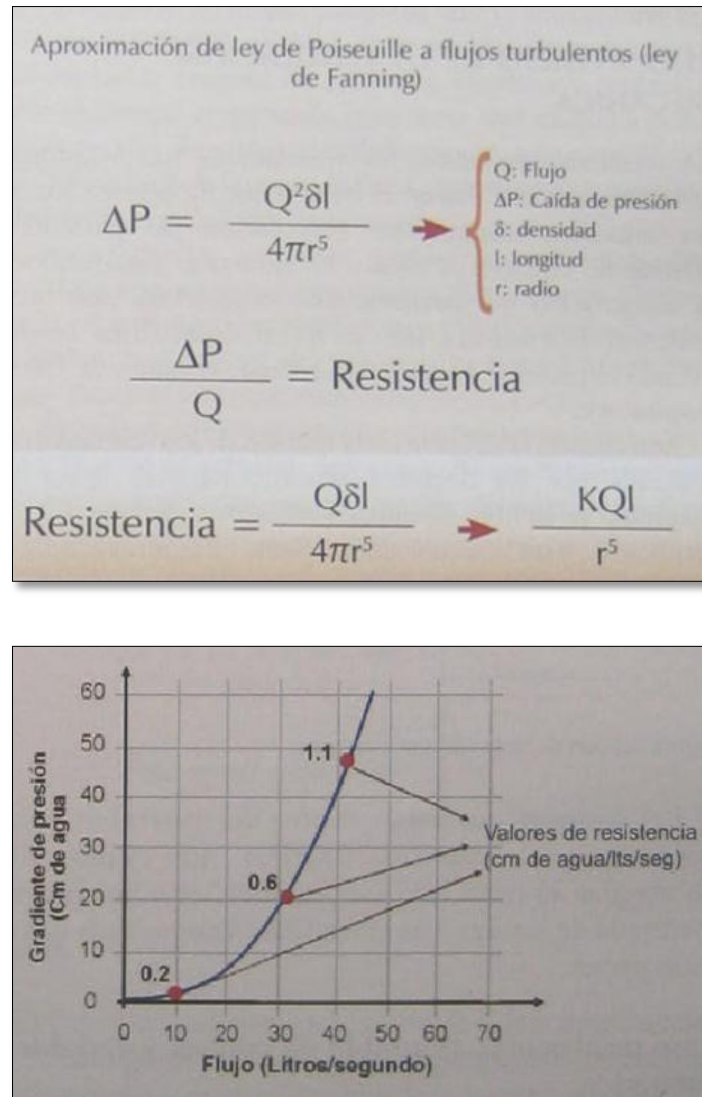
como  $\frac{\Delta P}{Q} = \text{Resistencia}$

$$\text{Resistencia} = \frac{8 n l}{\pi r^4} \rightarrow \frac{K l}{r^4}$$



**Figura 1.3.1.8.** Fórmulas y gráfica de resistencia con flujo laminar.

La constante K depende de la viscosidad, por esto a los flujos laminares también se les conoce como flujos viscosos. Se puede observar que cuando el flujo es laminar la resistencia depende proporcionalmente de la distancia e inversamente proporcional al radio elevado a la cuarta potencia. Disminuir el radio a la mitad equivaldría a aumentar la resistencia 16 veces, mientras disminuir la longitud a la mitad disminuye la resistencia también a mitad. Cuando el flujo es turbulento ya no es válida la expresión de Hagen-Poiseuille, es la fórmula de Fanning la que explica la resistencia en este tipo de flujos.



**Figura 1.3.1.9.** Fórmulas y gráfica de resistencia con flujo turbulento.

La constante K depende de la densidad. Se puede observar que cuando el flujo es turbulento la resistencia depende proporcionalmente de la distancia y es inversamente proporcional al radio elevado a la quinta potencia. Disminuir el radio a la mitad equivaldría a aumentar la resistencia 32 veces. Mientras disminuir la longitud a la mitad disminuye la resistencia también a la mitad.

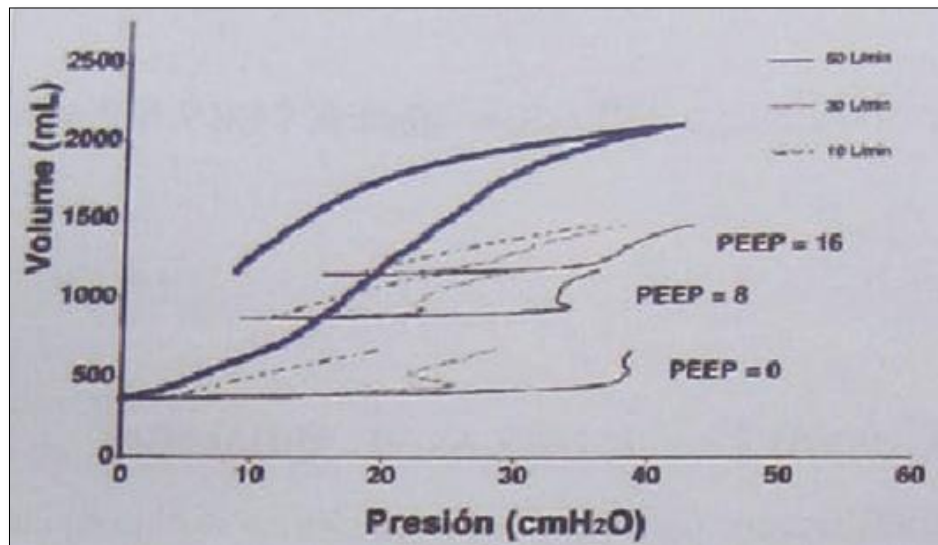
De todo lo anterior se puede concluir que en términos de transporte de volúmenes (flujos), el flujo laminar es menos resistivo y que independientemente del régimen laminar o turbulento, los diámetros de los conductos no deben disminuirse porque aumentan de manera importante la resistencia a fluir.

### *Curva presión volumen*

La curva presión volumen del sistema respiratorio es un método fisiológico clásico empleado para describir las propiedades mecánicas del sistema respiratorio. La relación casi estática P-V es uno de los aspectos del comportamiento mecánico que ha sido empleado para obtener información acerca de la forma en que se modifican los pulmones durante la respiración en personas sanas y enfermas. Se ha sugerido que la medición de la curva P-V en pacientes críticamente enfermos se puede emplear como un método para evaluar la severidad del daño pulmonar y para monitorear la evolución de la enfermedad.

Cada vez que se mide la presión cuando el flujo de aire ha parado, hay siempre un cambio continuo en la presión disminuyendo en forma exponencial. Debido a que se debe permitir que el paciente respire, la medición debe ser interrumpida después de algunos segundos. Por lo tanto el sistema nunca alcanza condiciones realmente estáticas.

El término confuso 'distensibilidad dinámica' ha sido empleado para referirse a diferentes cosas, pero originalmente se refería a la distensibilidad calculada durante una respiración corriente ( $V_t$ ) en el punto de cero flujos en el asa P-V dinámica.



**Figura 1.3.1.10.** Comparación de las curvas P-V dinámica y estáticas. La línea gruesa representa la curva casi estática, las líneas delgadas representan curvas contraídas.

### 1.3.2 Compliancia

Es la distensibilidad o capacidad del pulmón de dejarse distender. Para que el gas insuflado llegue a los pulmones se debe aplicar una presión que venza la resistencia elástica a la expansión que ofrecen los pulmones y la pared torácica. La relación entre este gradiente de presión y el aumento de volumen pulmonar se conoce como Compliancia o distensibilidad.

$$C = \Delta V / \Delta P \quad (1.3.2.1)$$

Donde C es la compliancia,  $\Delta V$  es la variación de volumen y  $\Delta P$  la variación de presión.

Es importante comprender que la compliancia es la capacidad del pulmón de dejarse distender, y por tanto es exactamente la inversa de la Elastancia, que es la capacidad que tiene el pulmón de recuperar su forma inicial. La compliancia del sistema respiratorio es la suma de la compliancia pulmonar y la de la pared torácica.

La compliancia se puede medir de forma exacta trazando las curva de Volumen/Presión (V/P) con el método de la superjeringa. La compliancia es la relación que se obtiene al inscribir, sobre un eje de coordenadas, los sucesivos incrementos de la presión intratorácica –en abscisas– correspondientes a la insuflación de volúmenes crecientes –en ordenadas-. La pendiente de este trazado representa el valor de la compliancia para ese determinado nivel de volumen pulmonar, de manera que una mayor pendiente indica una mayor distensibilidad del aparato respiratorio. Este método requiere la interrupción de la ventilación durante su realización.

Para la realización de esta medida se recomienda que la ventilación sea controlada por volumen, que el VT sea elevado (12 a 15 mL/kg), y que la pausa teleinspiratoria (plateau) se prolongue durante 1-2 segundos, para permitir el equilibrio de presiones entre las regiones pulmonares con distinta constante de tiempo. El valor normal de la C efectiva oscila entre 50-60 mL/cmH<sub>2</sub>O.

En función de la fase del tiempo inspiratorio en que se realice la medición de la compliancia, y por tanto en función del valor de presión que se utilice para calcularla, se habla de:

- **Compliance dinámica:** Se mide justo después de la finalización de la insuflación. Existe controversia en cuanto al valor de presión empleado para su cálculo, ya que algunos autores emplean la presión pico, mientras que otros sugieren la P1:

$$C_d = VT / P_{pk} - PEEP \quad (1.3.2.2)$$

- **Compliance estática:** Se mide tras una pausa inspiratoria prolongada (2-3 segundos) que permite el equilibrio de presiones entre las zonas pulmonares con distintas constantes de tiempo. Por ello, el valor de presión empleada es la presión plateau:

$$C_e = VT / P_{plet} - PEEP \quad (1.3.2.3)$$

Este valor es más fidedigno pues al calcularse tras la equiparación de presiones entre las regiones con diferente constante de tiempo que ocurre durante la pausa inspiratoria, permite reflejar la compliance en aquellos casos en los que hay gran heterogeneidad pulmonar.

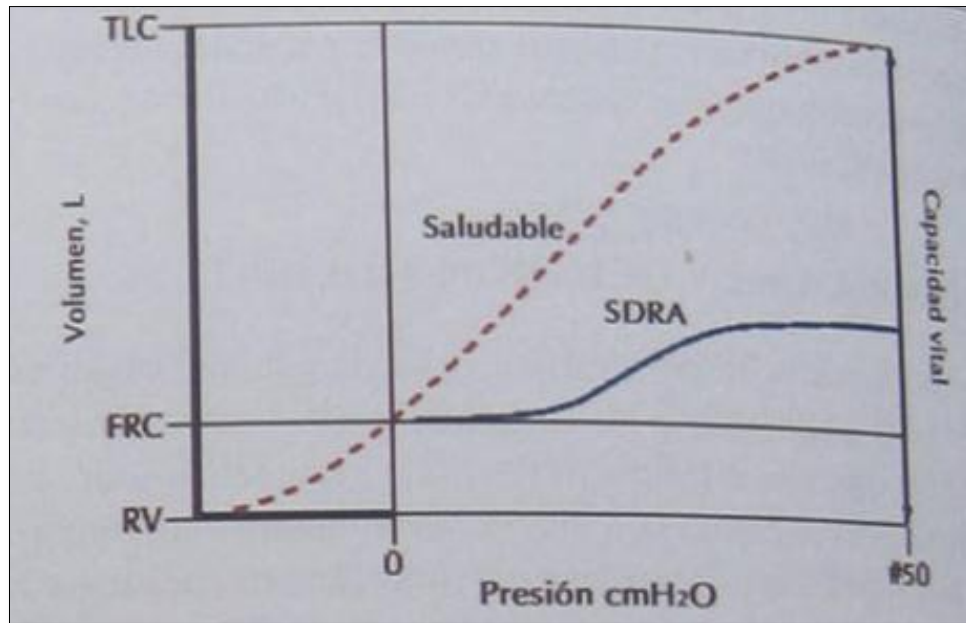
### **Situaciones clínicas con Compliance baja:**

La compliance del sistema respiratorio es la suma de la compliance del pulmón y la de la pared torácica, por lo que las alteraciones de la misma se pueden dividir en dos grandes apartados en función de su origen.

#### ***A) Por reducción de la Compliance Pulmonar.***

- Reducción del número de alveolos funcionantes:
  - Fibrosis pulmonar.
  - SDRA (síndrome de dificultad respiratoria aguda).
  - Atelectasias.
  - Intubación bronquial selectiva.
- Ventilación con VT muy elevados. Sobre distensión.





**Figura 1.3.2.1.** Curva P-V en sujetos sanos y en síndrome de dificultad respiratoria. TLC, capacidad pulmonar; FRC, capacidad residual funcional; RV, volumen residual.

***B) Por reducción de la Compliancia de la pared torácica.***

- Alteraciones de la forma:
  - Cifoescoliosis.
  - Espondilitis anquilopoyética.
- Compresión:
  - Obesidad.
  - Ascitis, distensión abdominal.

**Situaciones asociadas a Compliancia elevada:**

Enfisema Pulmonar, por destrucción de las paredes alveolares.

### 1.3.3 Resistencia

Es la resistencia friccional que oponen las vías aéreas al flujo de gas circulante, siendo la presión necesaria para generar un flujo de gas a través de las vías aéreas. Se expresa como la relación entre este gradiente de presión ( $\Delta P$ ) y el flujo de aire ( $\dot{V}$ ):

$$R = \Delta P / \dot{V} \quad (1.3.3.1)$$

Los valores habituales en el paciente intubado son de 10-15 cmH<sub>2</sub>O·s·L<sup>-1</sup>. Las resistencias inspiratorias y las espiratorias pueden ser diferentes (hasta un 15%), siendo esta diferencia más marcada en los pacientes con patología obstructiva en los que las presiones son mayores. El tubo endotraqueal constituye el elemento más resistivo del sistema respiratorio. La resistencia inspiratoria se calcula a partir del gradiente de presión entre presión pico y presión plateau, dividido por el flujo inspiratorio. ( $R_i = P_{pk} - P_{plt} / V_i$ )

La resistencia espiratoria se puede calcular de forma simple a partir de la constante de tiempo, dividiendo el tiempo espiratorio por 3 veces la compliancia ( $R_e = t_e / 3 C$ ).

Situaciones clínicas en las que las resistencias están elevadas (> 20-25 cmH<sub>2</sub>O·s·L<sup>-1</sup>):

#### **A) Basalmente:**

- E.P.O.C. (Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica).
- Enfisema Pulmonar.

#### **B) En el curso de la ventilación mecánica:**

- Broncoespasmo, tapón mucoso, acodamiento del tubo, intubación bronquial inadvertida.

## 1.4 Estudio de los equipos existentes

Antes de empezar con el diseño del producto se realizó un estudio sobre los simuladores que hay en el mercado, con el fin de analizar, observar y comparar lo que hay actualmente en el mercado. Con este estudio se determinaron los puntos que son importantes y los que no lo son, para así poder realizar un producto de calidad, enfocándolo de la mejor manera para que éste se adapte a las necesidades requeridas.

Para la realización del proyecto se dispone del modelo de pulmón de pruebas Maquet 190. De éste tipo existen varias marcas que solo varían en el precio pero no en las prestaciones.

Por otra parte está el modelo Biomedical LS-2000, el cual parte del modelo de pulmón anterior pero en el que se ha añadido la posibilidad de cambiar las condiciones fisiológicas para una simulación más completa.

A continuación se describirán los dos modelos:

### **Siemens Maquet Test Lung 190**

El Maquet 190 es el pulmón con el cual parte la necesidad de éste proyecto (cedido por el Hospital San Juan de Dios - Barcelona). Es un modelo sencillo en el que no se pueden simular automáticamente las condiciones fisiológicas de los pacientes.



**Figura 1.4.1.** Simulador pasivo de pulmón Siemens Maquet Test Lung 190. Siemens Maquet Adult 1 Liter Ventilator Test Lung 190 #6006832.

#### ***Aspectos positivos:***

Es un pulmón de pruebas de alta calidad de un litro de capacidad. Tiene una larga durabilidad con la posibilidad de intercambiar el globo en caso de que éste se estropee. Es transportable ya que las dimensiones (297x100x44mm) y peso (0.190 kg) son mínimos.

***Aspectos negativos:***

El pulmón no puede reproducir las diferentes condiciones fisiológicas de los pacientes. Por ejemplo, para poder variar la compliancia pulmonar se usa una pinza para limitar el volumen del pulmón. Este procedimiento se realiza manualmente.

**BC BIOMEDICAL LS-2000 SERIES:**

El LS-2000 es un simulador de pulmón de concepto simple, pequeño y transportable, el cuál incorpora un ajuste manual de la compliancia, resistencia y fugas. Existen dos modelos, uno para adultos (LS-2000A) y otra versión pediátrica (LS-2000I).



**Figura 1.4.2.** Simulador pasivo de pulmón LS-2000 (versión para adultos y pediátrica).

***Aspectos positivos:***

Como se puede observar en la figura anterior, es un simulador de pulmón el cual permite la variación de la compliancia (4 posiciones diferentes), la resistencia (4 posiciones diferentes) y la posibilidad de simular fugas. El peso de éste modelo es de 0.325 kg la versión para adultos y 0.285 kg la pediátrica.

***Aspectos negativos:***

El pulmón reproduce las diferentes condiciones fisiológicas de los pacientes, pero se realizan de forma manual.

## 2. Primer Bloque: Diseño y fabricación del mecanismo

Una vez reconocida la necesidad que tienen los médicos docentes, la falta de automatización en la variación de la compliancia pulmonar, se pasa a la siguiente fase del ciclo del proceso del diseño.

Éste primer bloque está compuesto por la parte mecánica, donde se realizará el diseño y fabricación de un mecanismo capaz de variar la compliancia de forma automática. Para ello se hará uso de herramientas CAD (SIEMENS NX) en el diseño 3D, y de las máquinas-herramientas disponibles en los laboratorios de la escuela para realizar la fabricación.

### 2.1 Diseño del mecanismo

La necesidad principal que tienen los médicos docentes es la falta de automatización en la compliancia pulmonar. Como se ha podido observar en el simulador que hay en el mercado ésta función es manual y funciona de la siguiente manera:

El pulmón consta de cuatro orificios que serán los niveles de compliancia posibles y se ajustan manualmente con la ayuda de unas barras.



*Figura 2.1.1.* Detalle del sistema de ajuste de compliancia del simulador LS-2000.

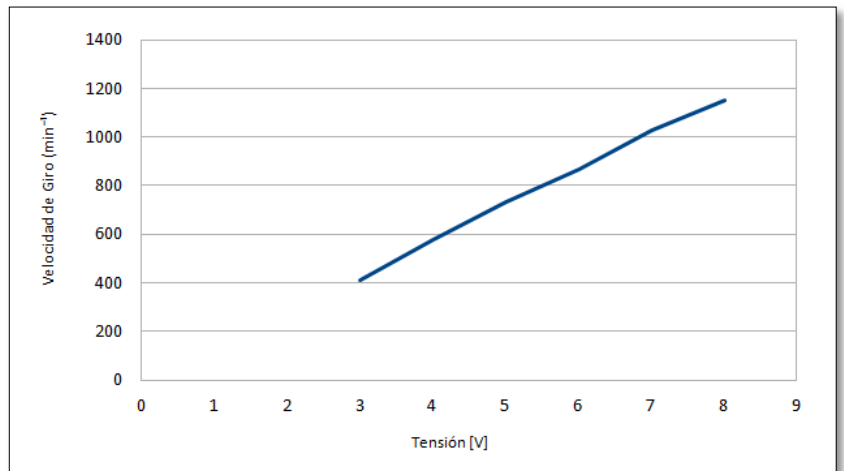
Por lo tanto se parte de una idea principal que es la de realizar un mecanismo para mover automáticamente unas "barras". El pulmón a utilizar será el modelo Maquet 190 (descrito en el punto anterior), y para el mecanismo se utilizará un kit que consta de un motor con un juego de engranajes. A continuación se describirán las características del motor y sus accesorios:

### **Motor:**

Motor con mecanismo por medio de poleas, correas y rueda dentada con una reducción de 17:1. Eje de trabajo doble de 20 mm. a cada lado y diámetro 4 mm. Funciona entre 1,5V y 12V.

**Tabla 2.1.1:** Velocidad de giro del motor en función de la tensión aplicada.

Tensión	Velocidad de giro
[V]	[min <sup>-1</sup> ]
3	410
4	575
5	735
6	865
7	1030
8	1150



### **Surtido de engranajes Módulo 1:**

Este surtido incluye ejes de 125 mm. y diámetro 3 mm., que pueden cortarse a la longitud deseada. Son engranajes planos de 10, 15, 20 y 40 dientes, además de coronas de 15 dientes y dos tornillos-sin-fin, pueden fijarse tanto en motores con ejes de 2 mm. como de 3 mm.



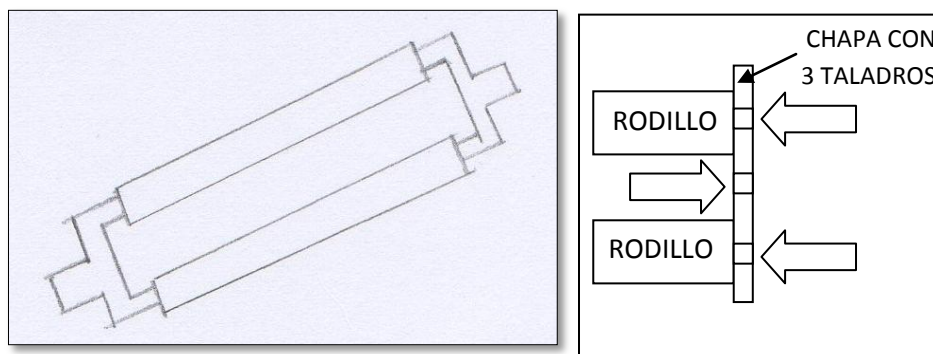
**Figura 2.1.2.** Motor eléctrico y surtido de engranajes.

Con el pulmón, el motor y los engranajes se inicia el diseño del mecanismo, teniendo en cuenta dos preguntas:

- ¿**Qué** es lo que se necesita?

Se necesita diseñar un mecanismo que permita regular la compliancia moviendo dos "barras", a partir de ahora denominadas "rodillos".

Los rodillos tendrán que fijarse al mecanismo mediante unos acoples para poder realizar el movimiento lineal. Este acople se realizará con una chapa la cual tendrá 3 taladros, de los cuales dos servirán para fijar los rodillos y el central para fijarse al mecanismo. Con ésta pregunta se obtiene el boceto de cómo tendrían que ser los rodillos y un esquema de como se montaría la chapa.



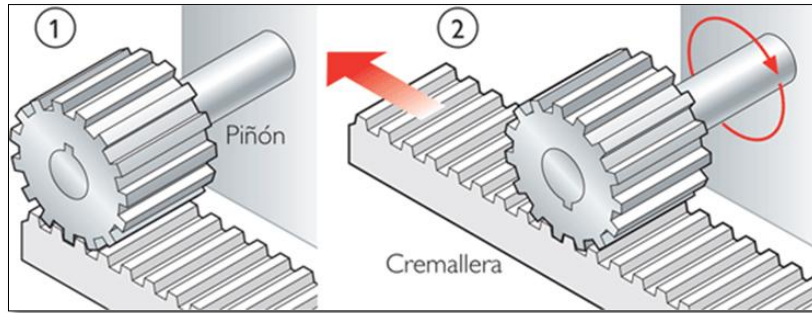
*Figura 2.1.3.* Boceto de los rodillos y esquema del acople al mecanismo.

- ¿**Cómo** se realizará el movimiento de los rodillos?

Con la idea clara de lo que se necesita, se pasa a la siguiente pregunta: ¿Cómo se realizará el movimiento de los rodillos?

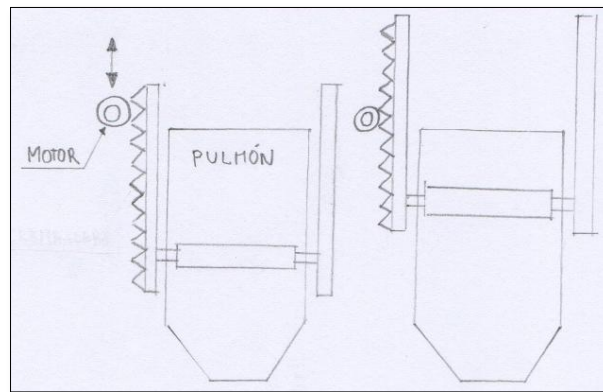
El motor junto con los engranajes descritos anteriormente serán los encargados de transmitir el movimiento. Por lo que se parte de la necesidad de pasar de un movimiento circular a un movimiento lineal, surgiendo el primer boceo o idea de un posible mecanismo.

Se planteó el uso de una cremallera para realizar el movimiento lineal de los rodillos. El motor llevaría incorporado un piñón que transmitiría el movimiento a la cremallera para mover los rodillos linealmente a través del pulmón.



**Figura 2.1.4.** Mecanismo piñón-cremallera.

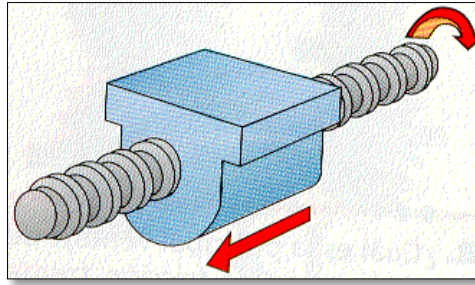
Pero al realizar el boceto se encontró un problema. Al mover la cremallera desde la parte inferior hacia la parte superior, sobresaldría considerablemente, con lo que no sería viable por temas de dimensiones ya que sería necesario un simulador el doble de grande.



**Figura 2.1.5.** Primer boceto con mecanismo piñón-cremallera.

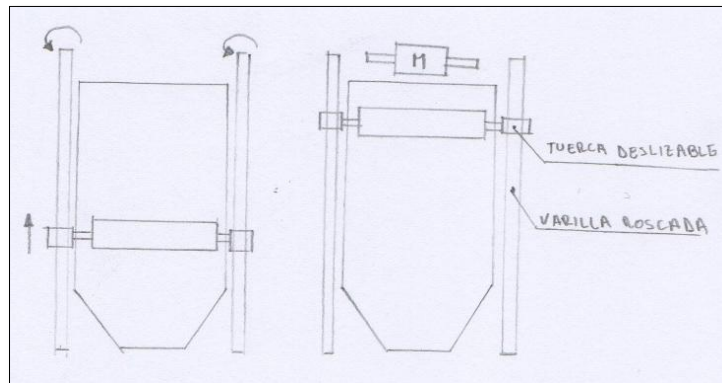
Acto seguido se empezó a pensar en otro mecanismo pero con la condición de mover únicamente los rodillos, es decir, que para realizar el movimiento lineal no se necesite mover todo el mecanismo. A partir de ésta condición sale la idea de usar un mecanismo de husillo-tuerca, con lo que el motor transmitiría el movimiento al husillo que haría subir o bajar una tuerca en la cual se podrían acoplar los rodillos.





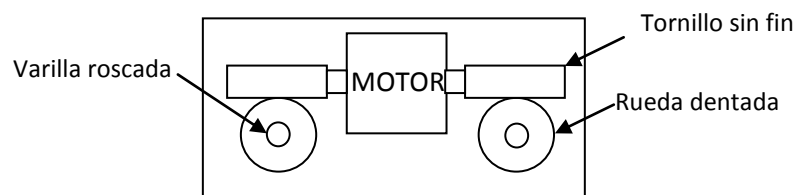
**Figura 2.1.6.** Mecanismo husillo-tuerca.

Con la ayuda del sistema propuesto se realizó el segundo boceto del posible mecanismo, observando que podría ser viable ya que el motor transmitiría el movimiento a al husillo (a partir de ahora varillas roscadas), que a su vez moverían linealmente unas tuercas (a partir de ahora tuercas deslizables).



**Figura 2.1.7.** Segundo boceto con mecanismo husillo-tuerca.

El mecanismo estaba claro, pero el siguiente paso era pensar en la manera de transmitir el movimiento del motor a la varilla roscada. Por lo que se planteó lo siguiente: El motor llevará acoplados dos tornillos sin fin (uno en cada extremo). Se fijarán dos ruedas dentadas a las dos varillas roscadas para que giren solidariamente. Por lo tanto el tornillo sin fin transmitiría el movimiento a las ruedas dentadas, que girarán solidariamente con las varillas roscadas permitiendo que las tuercas deslizables se desplacen linealmente.



**Figura 2.1.8.** Esquema de la transmisión del movimiento (vista en planta).

Con el sistema de transmisión definido, se procedió a realizar el cálculo de la relación de transmisión entre el tornillo sin fin y la rueda dentada, y entre la rueda dentada y la varilla roscada. De esta manera determinar el avance de la turca deslizable.

Para determinar la relación de transmisión entre el tornillo sin fin y la rueda dentada es necesario tener en cuenta el número de entradas del tornillo sin fin como elemento motor, y la fórmula utilizada es:

$$n_1 * e_1 = n_2 * z_2 \quad (2.1.1)$$

Donde: "n" es el número de vueltas, "Z<sub>2</sub>" el número de dientes de la rueda conducida y "e" el número de entradas del tornillo sin fin.

Una vez obtenida la relación entre el tornillo sin fin y la rueda dentada, se procedió al cálculo del avance de la tuerca deslizable con la siguiente fórmula:

$$A = p * n_2 \quad (2.1.2)$$

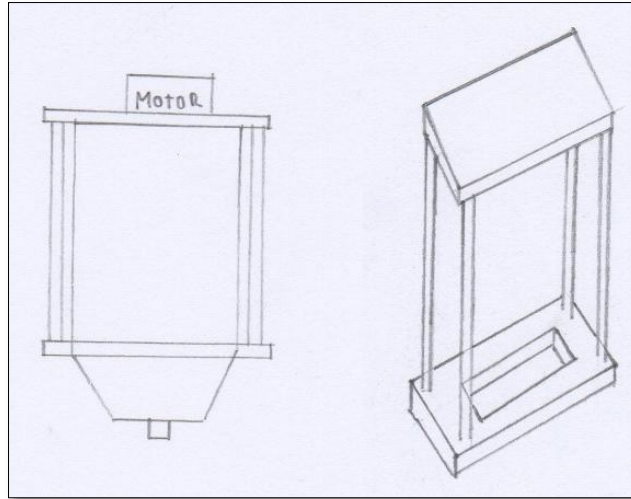
Donde: "A" es el avance (mm/min) de la tuerca deslizable, "p" el paso de rosca (mm) de la varilla y "n<sub>2</sub>" la velocidad de la rueda dentada (teniendo en cuenta el voltaje aplicado y la reducción que hay entre el tornillo sin fin y la rueda dentada).

**Tabla 2.1.2:** Relaciones de transmisión.

RELACIONES	
Tornillo sin fin + Rueda dentada (Fórmula 2.1.1)	$1 * 1 = n_2 * 20$ $\frac{1}{20} = n_2$
Paso de varilla roscada M5	$p = 0.8 \text{ mm}$
Avance de la tuerca deslizable [Motor a 3V = 410 rpm] (Fórmula 2.1.2)	$A = 0.8 * \frac{410}{20}$ $A = 16.4 \text{ mm/min}$

Por lo que se obtuvo que los rodillos tendrían un avance de 16.4mm/min, o lo que es lo mismo 0.27mm/s.

Una vez determinado el mecanismo que transmitirá el movimiento, era necesario definir una estructura firme para hacer de soporte al pulmón y al motor. Dicha estructura constará de cuatro tubos a los cuales se introducirán cuatro varillas roscadas. Además de dos bases (a partir de ahora base motor y base inferior). La base motor será donde se asentará el motor con su respectivo mecanismo, y la base inferior deberá tener un orificio en el cual se podrá introducir o retirar el pulmón.



**Figura 2.1.9.** Boceto de la estructura para el mecanismo.

Observando el modelo de pulmón Maquet se obtuvo la posible forma de adaptarlo. Una vez introducido, la parte inferior que sobresale del pulmón sería la encargada de hacer tope en la base inferior y de ésta manera ajustarlo a la estructura.



**Figura 2.1.10.** Detalle de la parte inferior del pulmón Maquet.

Con las dos preguntas respondidas, qué y cómo, se ha podido definir el posible diseño del simulador pasivo de pulmón. Por lo tanto el simulador constará de las siguientes partes principales o subconjuntos:

**Subconjunto estructura:**

El subconjunto estructura estará compuesto por la base motor, base inferior, cuatro tubos y cuatro varillas roscadas.

**Subconjunto mecanismo:**

El subconjunto mecanismo constará de un motor (el cual incluye un juego de engranajes) y dos varillas roscadas a las cuales el motor transmitirá el movimiento y serán las guías de las tuercas deslizables.

**Subconjunto rodillos:**

Éste subconjunto estará compuesto de dos rodillos, 4 acoples y dos chapas con taladros encargados de fijar los rodillos, y la tuerca deslizable.

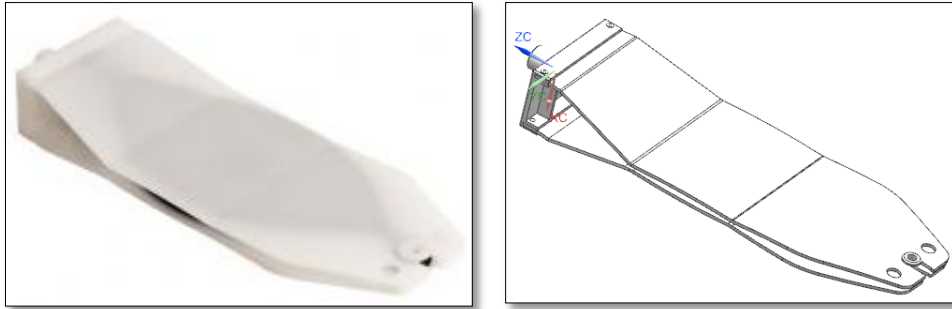
Aparte de estos tres subconjuntos se añadirán elementos normalizados que se comprarán en ferretería o se fabricarán. Realizando funciones de fijación (tornillos, tuercas, etc.) o de evitar rozamientos (casquillos, arandelas, etc.).

**2.1.1 Desarrollo del modelo 3D**

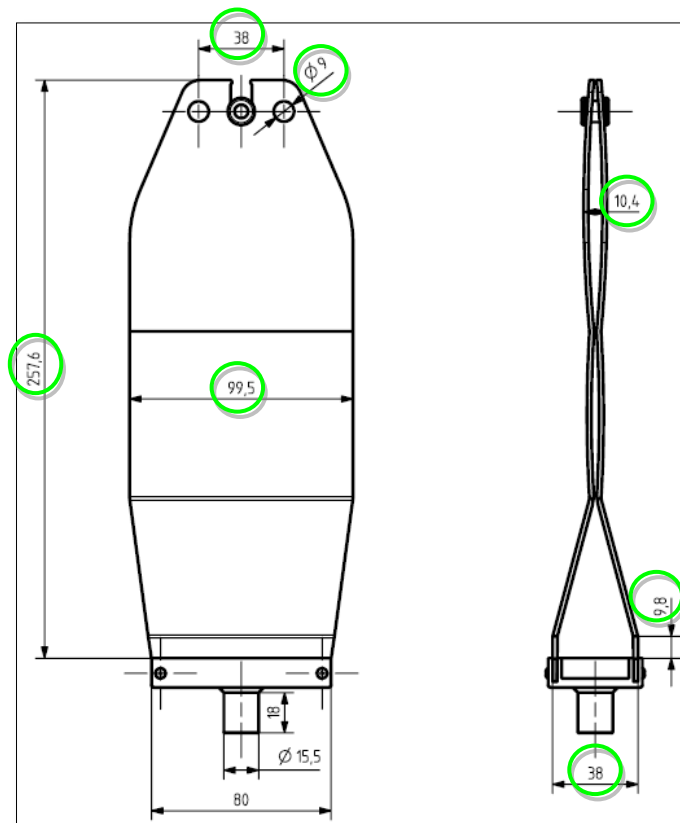
En el apartado anterior se definió el mecanismo a utilizar y los diferentes componentes que lo formarán.

Como se mencionó anteriormente, el simulador parte del pulmón Maquet y el motor reductor. Es por ello que primeramente se realizó el modelado de estos dos componentes para posteriormente obtener las medidas necesarias para modelar las diferentes piezas que forman los subconjuntos.

Primeramente se realizó el modelado del pulmón con el cual se está realizando el proyecto, para posteriormente obtener las medidas necesarias y poder dimensionar el resto de piezas.



**Figura 2.1.1.1.** Pulmón Maquet y su modelo en 3D.

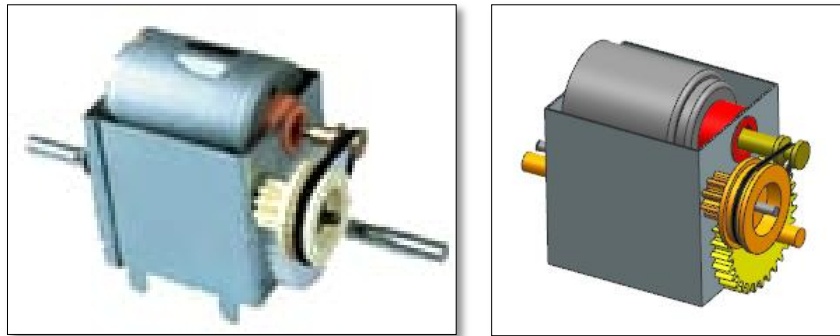


**Figura 2.1.1.2.** Plano del alzado y perfil del Pulmón Maquet.

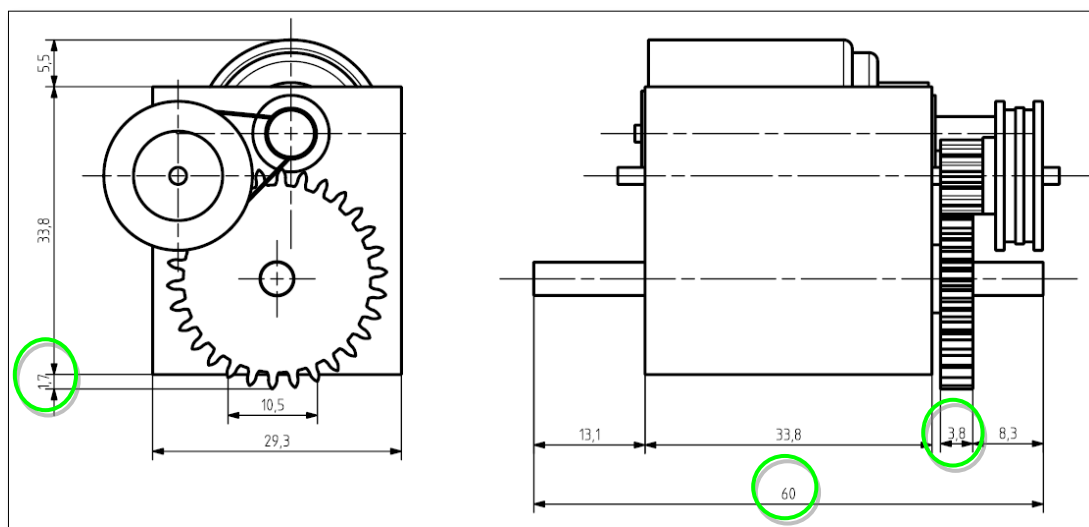
Las medidas a tener en cuenta para el dimensionado de los componentes son las mostradas en la figura anterior. La distancia entre la base inferior y base motor deberá tener una medida de 257.6mm. Para el diseño de la cavidad de la base inferior se tiene que tener en cuenta que el simulador debe poder pasar y quedar ajustado cuando haga tope con el pulmón. Es por esto que de ancho tendrá que tener una longitud de 38mm y de largo más de 99.5mm para permitir insertar o extraer el pulmón. Por otra parte, la chapa donde se fijan los rodillos tendrá que tener una longitud de más de 10.4mm para evitar que los rodillos toquen las caras del pulmón y puedan desplazarse libremente. Los dos orificios de la parte superior del pulmón, ayudarán a fijarlo al mecanismo. Por lo

que la distancia y el diámetro son importantes para diseñar unas piezas para sujetar el pulmón a la base motor.

Acto seguido se realizó el modelado del motor con su respectivo plano, para determinar las medidas que influyen en el dimensionado del mecanismo.



**Figura 2.1.1.3.** Motor reductor y su modelo en 3D.



**Figura 2.1.1.4.** Plano del alzado y perfil del Motor reductor.

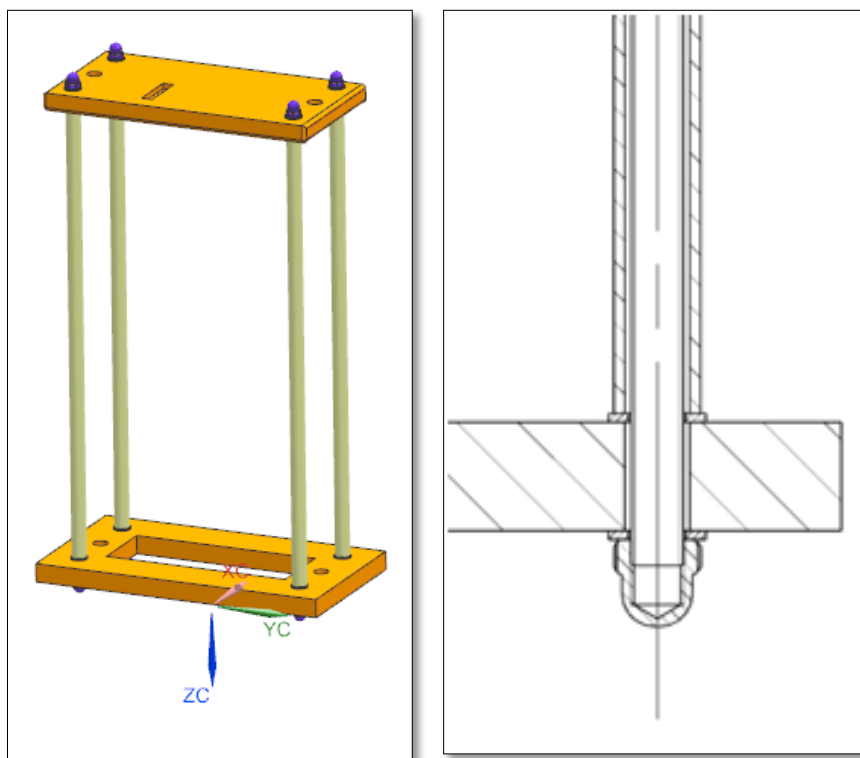
Las dimensiones del motor se tienen que tener en cuenta para posicionarlo en la base motor. Como se puede observar en la figura anterior, una de las ruedas dentadas del motor sobresale 1.7mm, por lo que hay que tener en cuenta la realización de un rebaje en la base para permitir que la rueda gire libremente. Además es importante la medida entre ejes del motor para poder añadir los tornillos sin fin y que engranen correctamente con las ruedas dentadas de las varillas roscadas.

Con las medidas a tener en cuenta del pulmón y del motor, se procedió al modelado de las piezas que forman el mecanismo. A continuación se irá explicando el proceso de

ensamblaje de los subconjuntos para finalmente mostrar el ensamblaje completo del mecanismo. En el anexo A se podrán encontrar los planos detallados de cada componente.

### **Subconjunto estructura:**

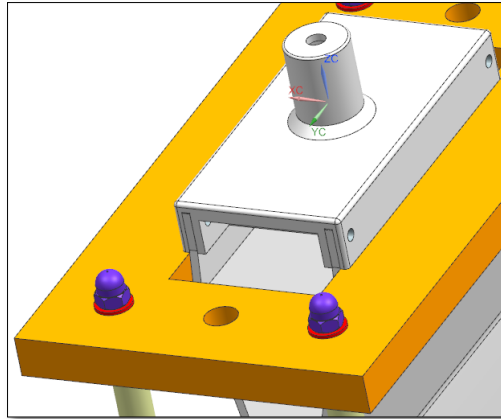
La estructura está compuesta por la base inferior, la base motor, cuatro tubos y cuatro varillas roscadas de sujeción que se introducen en los tubos para poder fijar las bases. Para el montaje se han utilizado 8 tuercas ciegas M5 (DIN 1587) y 16 arandelas M5 (DIN 125). El concepto de montaje es el mostrado en la siguiente figura.



*Figura 2.1.1.5.* Vista en isométrico y detalle de un corte de la estructura.

### ***Base inferior:***

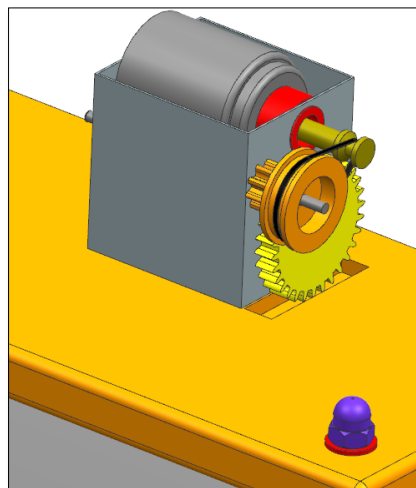
Teniendo en cuenta las dimensiones del pulmón, se realizó una abertura en la base inferior, permitiendo la entrada y salida del pulmón. Además se realizaron dos taladros extras que serán por donde pasarán las varillas roscadas del mecanismo. En la siguiente figura se muestra el detalle del pulmón ajustado en la base inferior.



**Figura 2.1.1.6.** Detalle de la base inferior de la estructura.

***Base motor:***

En la base motor, con dimensiones similares a la base inferior, se realizó un rebaje ya que uno de los engranajes del motor sobresale.

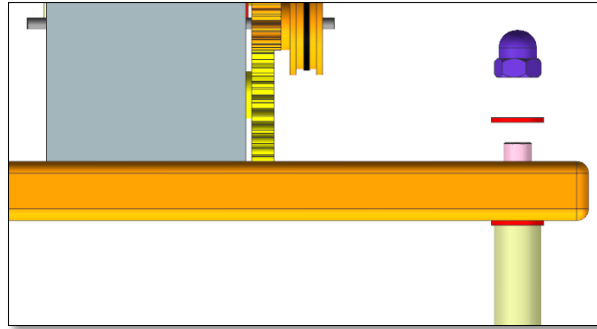


**Figura 2.1.1.7.** Detalle de la base motor de la estructura.

***Tubos y varillas roscadas:***

Los tubos son de diámetro interior 6mm y las varillas roscadas son M5. Las varillas se introducen en los tubos sobresaliendo para su montaje. A continuación se muestra la varilla sin montar.

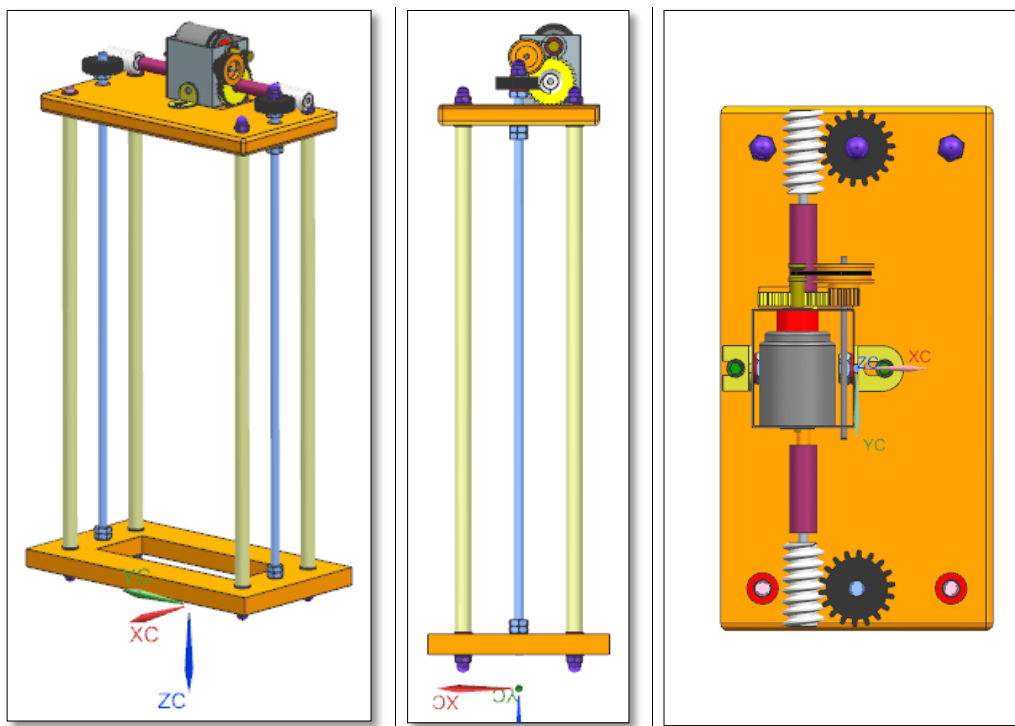




*Figura 2.1.1.8.* Detalle del tubo y la varilla roscada.

### **Subconjunto mecanismo:**

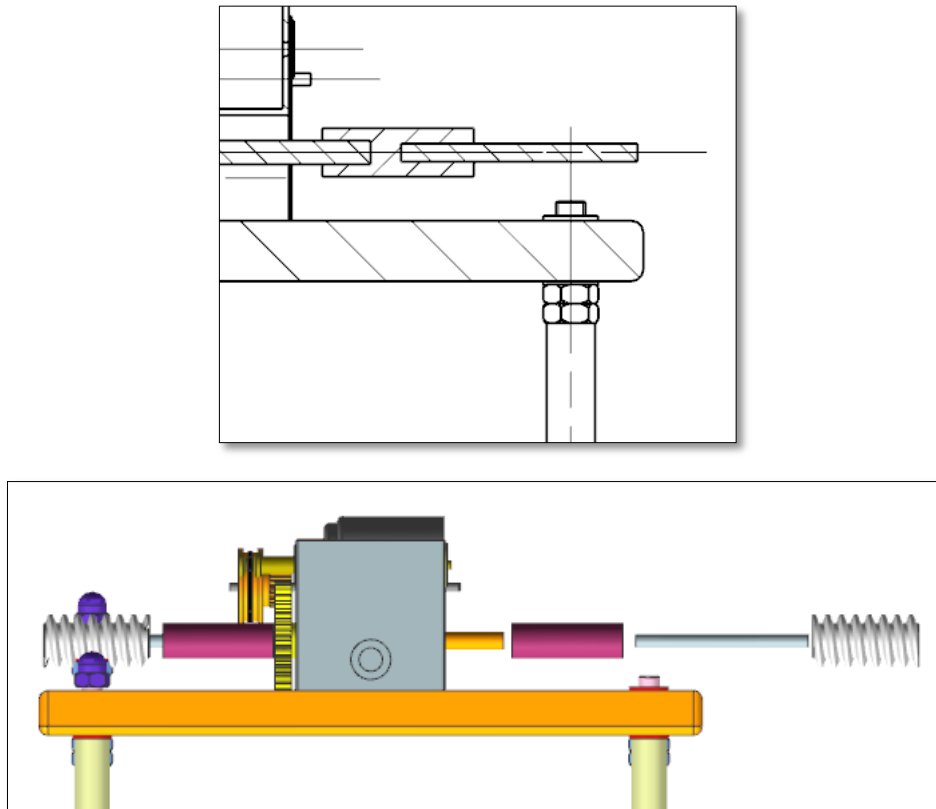
El mecanismo estará compuesto principalmente por el motor que es el que transmite el movimiento. El motor lleva incorporado dos tornillos sin fin que a su vez transfieren el movimiento a las ruedas dentadas. Dichas ruedas dentadas giran solidariamente con las varillas roscadas. Para el montaje se han utilizado 2 tuercas ciegas M5 (DIN 1587), 4 arandelas M5 (DIN 125) y 5 tuercas hexagonales (DIN 934). Para posicionar el motor se diseñaron dos escuadra (una de ellas modificada para que no sobresalga de la base) con tornillos avellanados de diámetro 2,5mm (DIN7982). Además se han diseñado cuatro casquillos que se insertan en las bases para evitar el rozamiento de las varillas y las bases. El concepto de montaje es el mostrado en la siguiente figura.



*Figura 2.1.1.9.* Vistas del subconjunto mecanismo.

### ***Motor:***

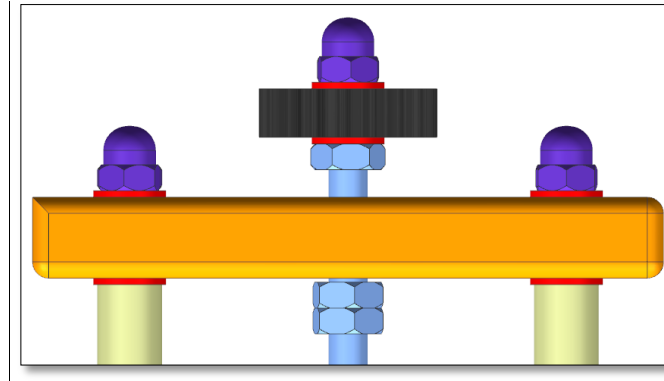
Al ser un motor de pequeñas dimensiones se podía mover por la base para poder centrarlo correctamente, por lo que en ese aspecto no era problema. Pero su eje era de un diámetro menor y no era posible adaptar los tornillos sin fin. Es por esto que se diseñó un acople de dos diámetros distintos para montar los tornillos sin fin.



***Figura 2.1.1.10.*** Vistas del acople para el tornillo sin fin.

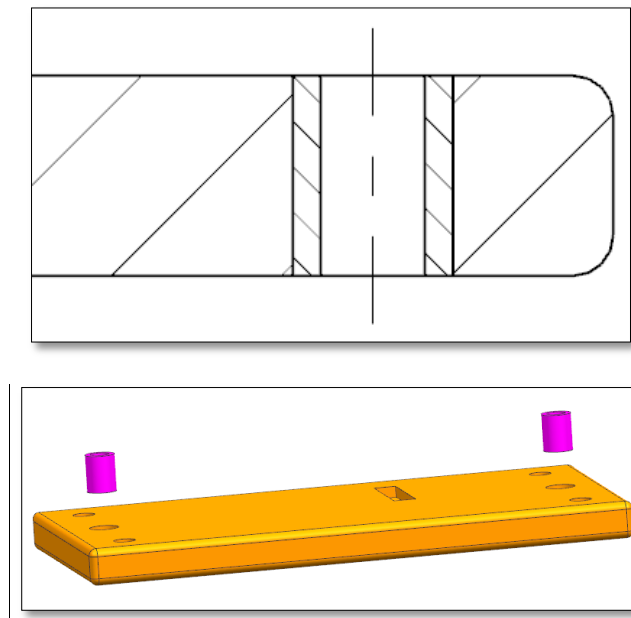
### ***Varillas roscadas:***

Para transmitir el movimiento a los rodillos era necesario que las varillas roscadas y las ruedas dentadas giren solidariamente. Para ello se utilizó una unión roscada, es decir, la rueda dentada se fijaría gracias a dos tuercas, una en cada extremo. Por otra parte se necesitaba posicionar las varillas roscadas a una determinada altura. Esto se realizó con la ayuda de 8 tuercas. Se situaron en parejas para ajustarlas y dejarlas en la posición deseada.



*Figura 2.1.1.11.* Detalle de los sistemas de fijación.

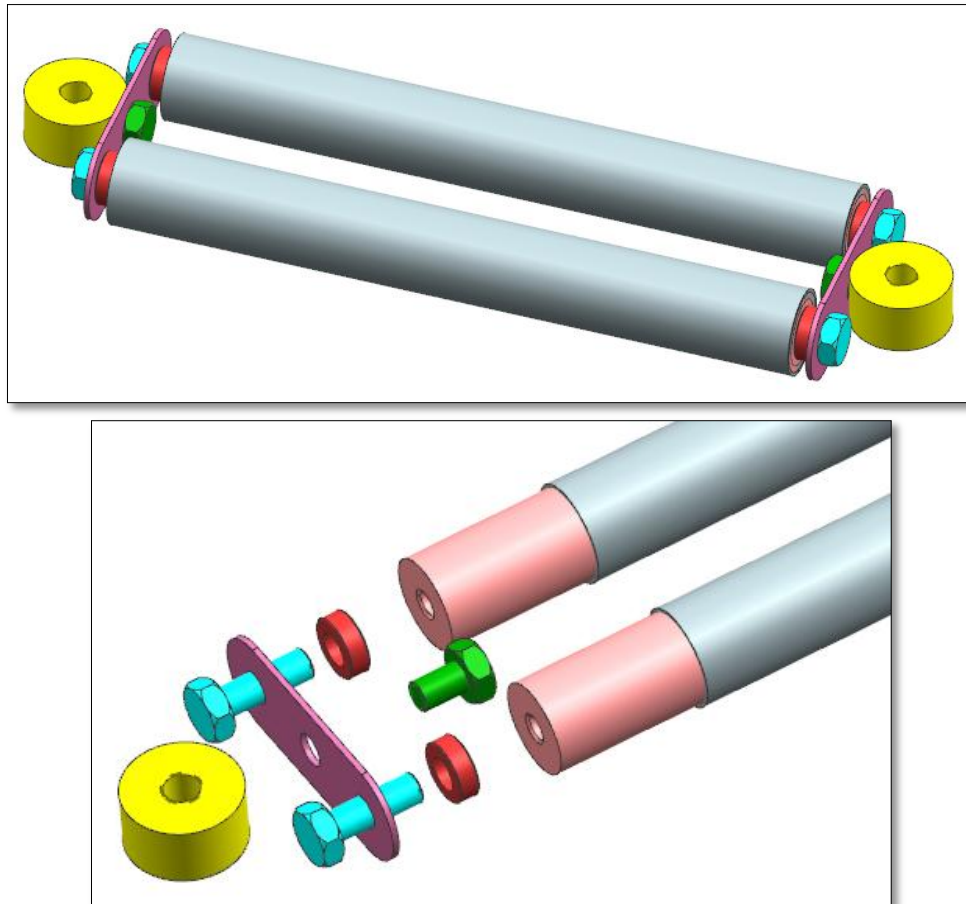
Finalmente se diseñaron unos casquillos para insertarlos en las bases y de esta manera evitar el rozamiento de las varillas roscadas al girar.



*Figura 2.1.1.12.* Detalle de los casquillos.

### **Subconjunto rodillos:**

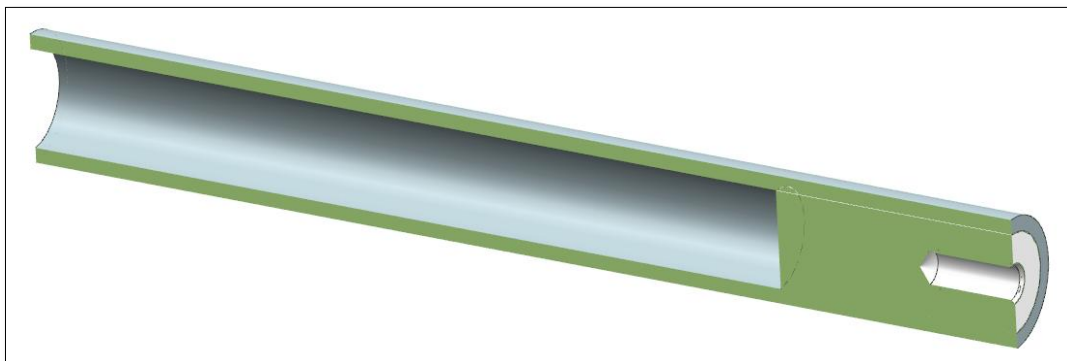
Por último se modelaron los rodillos (formados por un tubo al cual se introducen unos acoples), las chapas que permitirán fijar el subconjunto al mecanismo y la tuerca deslizable. Para el montaje se utilizaron 6 tornillos Allen M4 (DIN 933) de distintas longitudes, ya que por dimensiones de la tuerca deslizable, tenían que ser más cortos. Además se diseñaron 2 chapas para fijar los rodillos y la tuerca deslizable, y 4 casquillos que ayudarían a separar los rodillos de las chapas.



*Figura 2.1.1.13.* Subconjunto rodillos.

### ***Rodillos:***

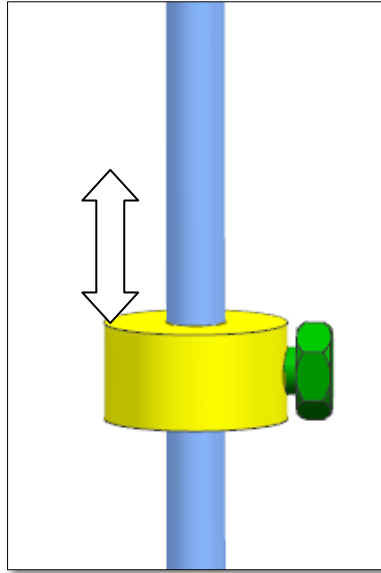
Como se comentó anteriormente, los rodillos están formados por un tubo al cual se introducen unos acoples. La función de los acoples es de fijar los rodillos a la chapa con tornillos M4.



*Figura 2.1.1.14.* Vista seccionada de los rodillos.

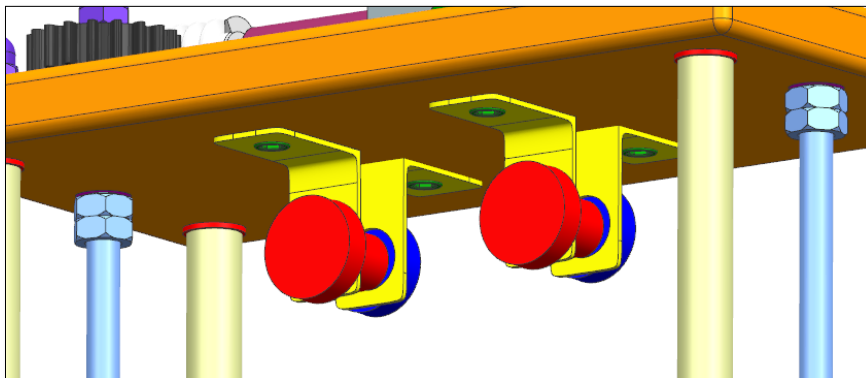
***Tuercas deslizables:***

El diseño de la tuerca deslizable es sencillo. Es un cilindro que consta de dos taladros roscados perpendiculares entre sí. Uno para fijar los rodillos y otro a las varillas roscadas para realizar el movimiento lineal.



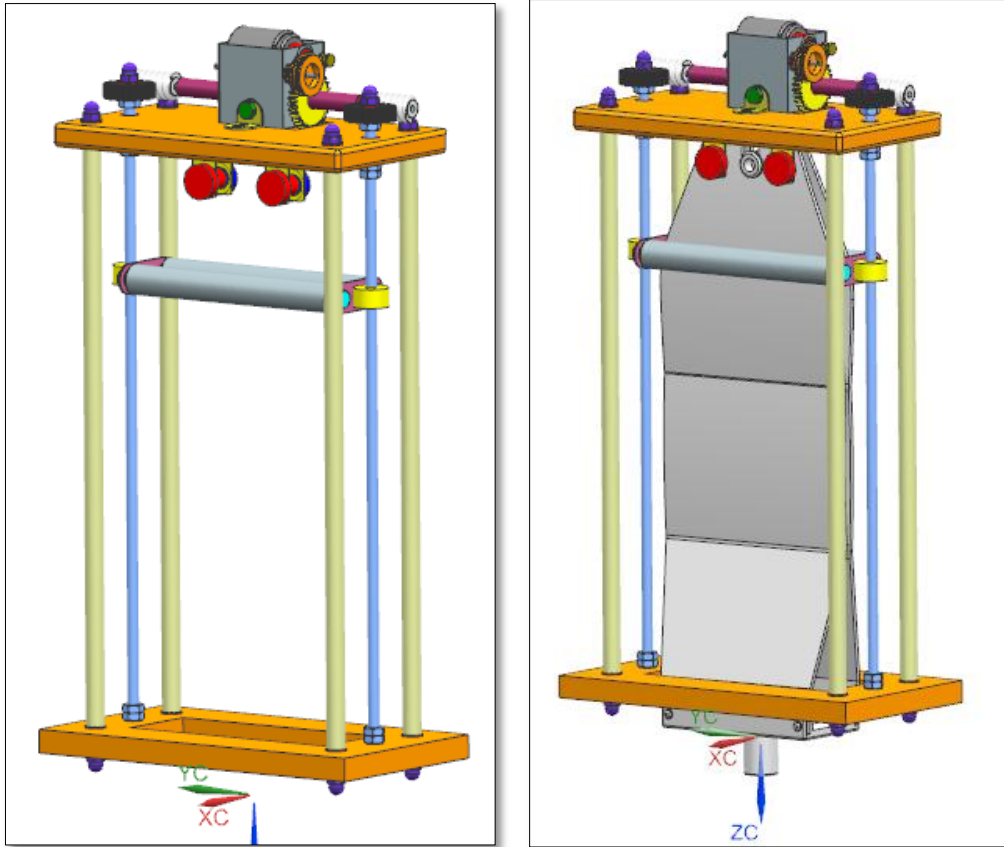
***Figura 2.1.1.15.*** Tuerca deslizable.

Como elementos adicionales, se diseñaron unas escuadras con sus respectivos pasadores para sujetar el pulmón cuando esté montado.

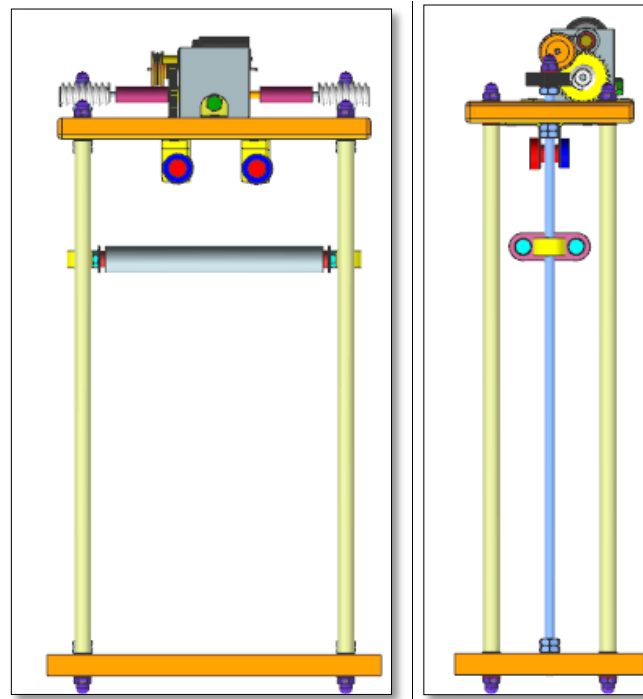


***Figura 2.1.1.16.*** Escuadras y pasadores de sujeción.

Finalmente con el ensamblaje de los tres subconjuntos, se obtiene el primer prototipo del mecanismo que simula la variación de la compliancia pulmonar.



*Figura 2.1.1.17.* Ensamblaje final con y sin pulmón.



*Figura 2.1.1.18.* Alzado y perfil del ensamblaje final.

### 2.1.2 Selección de materiales

Con el modelado en 3D del mecanismo se procedió a la selección de los materiales. El criterio para la búsqueda de materiales se basó en encontrar materiales comunes que se puedan adquirir en una ferretería o que estén disponibles en los laboratorios de la escuela, y que sean de fácil mecanización. A partir de estas condiciones se seleccionaron 4 materiales distintos:

- Nylon: Para las pequeñas piezas que necesiten ser mecanizadas.
- Madera: Para las bases de la estructura.
- Aluminio: Para los tubos de la estructura.
- Acero: Para todos los elementos de fijación.

**Tabla 2.1.2.1:** Lista de materiales a utilizar.

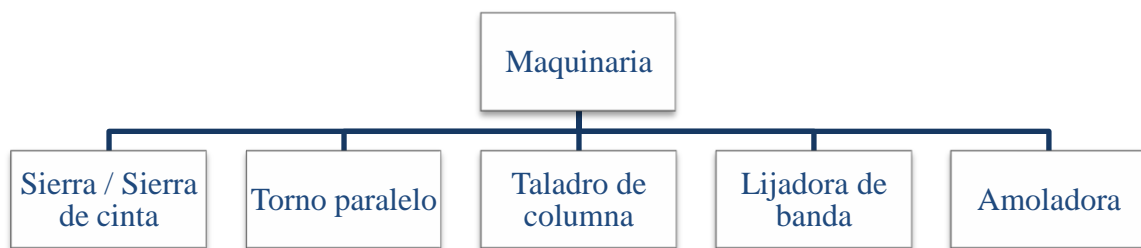
Material	Procedencia	Componente	Cantidad
<b>Nylon</b>	Ferretería (bruto de Ø15mm x 1m y de Ø8mm x 1m)	Casquillos	8
		Acoples	6
		Tuerca deslizante	2
		Pasador escuadra	2
		Tapa pasador escuadra	2
<b>Madera</b>	EPSEVG	Bases estructura	2
<b>Aluminio</b>	Ferretería (bruto de Ø8mm x 1m)	Tubos estructura	4
	Ferretería (bruto de Ø13mm x 1m)	Tubos rodillos	2
<b>Acero cincado</b>	Ferretería (varilla roscada de M5 x 1m y elementos de sujeción)	Varilla roscada M5	6
		Tuerca ciega hexagonal DIN 1587 M5	10
		Tornillo cabeza hexagonal DIN933 M5 x12	12
		Tornillo cabeza hexagonal DIN933 M5x6	6
		Tornillo cabeza avellanada Ø2,5x8	6
		Arandela plana DIN 125 M5	16
		Tuerca hexagonal DIN934 M5	10
	EPSEVG	Escuadras sujeción motor	2
		Chapa sujeción rodillos	2
		Escuadras sujeción pulmón	4

## 2.2 Fabricación del mecanismo

Continuando con el ciclo del proceso del diseño se procede a la fabricación del mecanismo. Para ello son necesarios los planos del mecanismo (Anexo A) y las fichas de fabricación (Anexo B).

### 2.2.1 Definición de maquinaria a utilizar

Como se ha podido observar en los apartados anteriores, el diseño del mecanismo es sencillo, por lo que no requiere procesos de fabricación complejos. Las maquinarias necesarias serán las disponibles en los laboratorios de la escuela y son las siguientes:



*Figura 2.2.1.1.* Esquema de máquinas a utilizar.

A continuación se muestra imágenes de la maquinaria utilizada que en la escuela.



*Figura 2.2.1.2.* Torno paralelo.





*Figura 2.2.1.3.* Amoladora y sierra.



*Figura 2.2.1.4.* Taladro de columna, sierra de cinta y lijadora de banda.

**Tabla 2.2.1.1:** Operaciones y herramientas que se usarán según la maquinaria

<b>Máquina</b>	<b>Operación</b>	<b>Herramienta</b>	<b>Sujeción</b>
<b>Sierra/ Sierra de cinta</b>	Serrado	Hoja de corte con filo/ hoja de corte para madera	Mordaza / manual
<b>Torno paralelo</b>	Refrentado	Cuchilla de exteriores	Plato de garras
	Cilindrado	Cuchilla de exteriores	
	Punteado	Broca de puntear	
	Achaflanado	Cuchilla de punta 45°	
	Ranurado	Cuchilla de ranurar	
	Taladrado	Broca	
<b>Taladro de columna</b>	Puntear	Broca de puntear	Mordaza
	Taladrado	Broca	
<b>Amoladora</b>	Afilar	Muela	Manual
	Quitar rebabas		
<b>Lijadora de banda</b>	Lijar	Lija de banda	Manual
<b>Manual</b>	Quitar cantos vivos	Lima	Tornillo de banco
	Marcado de centros	Granete y martillo	Manual
	Trazar	Gramil y mármol	Calzo
	Roscar interior	Macho de roscar	Tornillo de banco

### 2.2.2 Establecimiento parámetros de corte

Una vez diseñadas y dibujadas con herramientas CAD las piezas que forman el mecanismo, estructura y realizados los planos, se procedió a la fabricación.

Cada proceso de fabricación seleccionado ha tenido en cuenta las instalaciones y maquinaria que se dispone en la escuela, de manera que se pueda fabricar y montar todas las piezas del proyecto.

Una vez determinados los procesos y maquinaria que se va a utilizar para la fabricación del proyecto, la siguiente fase en la fabricación consiste en preparar las rutas tecnológicas u hojas de procesos de cada pieza a fabricar.

La hoja de procesos es un sencillo documento donde se recoge las tareas o pasos que se han de realizar para completar un trabajo. La hoja de proceso de una pieza es una hoja informativa en la que se recogen todas las características necesarias para su fabricación, operaciones a realizar y su secuencia de trabajo, tratados de forma secuencial, y con un

proceso lógico y estudiado de fabricación, máquinas que intervienen en su mecanizado, herramientas que se han de utilizar y sus características, así como los cálculos técnicos, etc. [2]

En el Anexo B se encontrarán todas las hojas de procesos de las piezas que se fabricarán o modificarán, el resto de componentes o elementos del proyecto serán comprados.

El siguiente paso es calcular los parámetros que se necesitan conocer para la fabricación, se comentarán y expondrán las fórmulas o tablas necesarias. En la mayoría de las máquinas herramientas la velocidad de corte se obtiene a partir de tablas gracias a la experimentación que han realizado los expertos en el trabajo de metales. El establecimiento adecuado de la velocidad de corte permite fácilmente la determinación del número de revoluciones a la que se debe operar la máquina. Cuando no se establece el número adecuado de revoluciones puede generar:

- a) Poco aprovechamiento de las capacidades de la máquina
- b) Baja calidad en las piezas fabricadas
- c) Daño a las herramientas o máquinas
- d) Baja efectividad en la planeación y programación del trabajo

Antes de mostrar las fórmulas con las que se establecen los parámetros de corte se va a comentar factores que intervienen en la maquinabilidad. Primero de todo la maquinabilidad es la mayor o menor facilidad a ser mecanizado un material, por herramientas o cuchillas de corte en máquinas-herramientas por arranque de viruta. La opción de poder mecanizar un material con facilidad, decimos que tiene buena maquinabilidad. En caso contrario decimos que el material tiene mala o deficiente maquinabilidad. Esta segunda opción puede ser motivo de rechazo del material.

Cada tipo de material es diferente a la hora de mecanizarlo, pero generalmente puede decirse que los materiales blandos se mecanizan mejor que los duros. Así por ejemplo el aluminio que se utiliza en el proyecto trabaja con mejor facilidad que el acero duro o la fundición y los bronce y latones se mecanizan con facilidad. Hay materiales muy blandos que dan problemas, como por ejemplos los plásticos que al mecanizarlos con herramienta no bien afilada o se trabaja a más velocidad de la recomendada o tiende a fundir por el calor producido en la mecanización y se producen rebabas muy difíciles de eliminar. También dan problemas similares los aluminos pastosos. Los aceros blandos

con durezas inferiores a 140HB se mecanizan mal porque cuesta desprender la viruta. Los aceros que se mecanizan bien son los que tienen durezas entre 140 y 200 HB.

Centrándonos en las cuchillas de corte, se va a comentar en qué consiste el rendimiento de una herramienta. El rendimiento de una cuchilla es la cantidad de viruta que puede arrancar entre dos afilados consecutivos, expresado en  $\text{dm}^3$ . En el rendimiento de herramientas de corte hemos de considerar:

1. Que partiendo de velocidades bajas e ir aumentando progresivamente la velocidad de corte, aumenta el rendimiento de la cuchilla, es decir, el volumen de viruta arrancada.
2. Al rebasar una determinada velocidad crítica, la duración del dilo desciende considerablemente.
3. La velocidad de máxima producción de viruta coincide con la mayor duración del filo, es decir, con la velocidad crítica o  $V_c$ .
4. La  $V_c$  y por tanto la producción máxima de viruta decrece a medida que aumenta la resistencia del material.
5. La máxima producción de viruta puede obtenerse con distintos valores de velocidad de corte, siempre que se modifique la profundidad de pasada y el avance.

Para determinar la velocidad (m/min) de corte se utiliza la siguiente expresión:

$$N = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot D} \quad (2.2.1.1)$$

Donde N son las revoluciones (rpm),  $V_c$  la velocidad de corte (m/min) y D diámetro a mecanizar (mm).

Se tiene que señalar que tanto para la sierra, sierra de cinta, lijadora de banda y amoladora no es necesario calcular las revoluciones a las que trabajaremos puesto que estas máquinas trabajan a una velocidad constante.

A continuación se muestra las tablas con las velocidades de corte para cada material y para cada máquina que vamos a utilizar:

**Tabla 2.2.2.1:** Valores de la velocidad de corte usando brocas de HSS.

Material a mecanizar	Velocidad de corte (m/min)
Acero	24-34
Aluminio	61-91
Nylon (PA)	30-91
Madera contrachapada	91-122

Fuente: [http://www.irwin.com/uploads/documents/92\\_Spanish\\_FLC\\_oMetal\\_eBook.pdf](http://www.irwin.com/uploads/documents/92_Spanish_FLC_oMetal_eBook.pdf)

\*Las velocidades pueden variar dependiendo del fabricante y la fuente

**Tabla 2.2.2.2:** Valores de la velocidad de corte para cilindrado y refrentado (torno)

Material a mecanizar	Velocidad de corte refrentado (m/min)	Velocidad de corte acabado (m/min)
Acero	27	30
Aluminio	61	93
Nylon (PA)	>200	

Fuente: [http://www.ensinger-inc.com/downloads/lit\\_spanish/Directricesmecanizado.pdf](http://www.ensinger-inc.com/downloads/lit_spanish/Directricesmecanizado.pdf)

Fuente: <http://areamecanica.azc.uam.mx/Lab%20Procesos%20de%20Manuf%20II/Archivos/Ejemplo%20Velocidad%20de%20corte.pdf>

\*Las velocidades pueden variar dependiendo del fabricante y la fuente

**Tabla 2.2.2.3:** Velocidad de corte para ranurado (torno)

Material a mecanizar	Velocidad de corte ranurado (m/min)
Nylon (PA)	16

Fuente: (Tecnología de Fabricación, 2008)

Una vez determinada la velocidad a la que se va a trabajar en el taladro y el torno es necesario calcular la fuerza de corte y potencia de corte para saber si las máquinas-herramientas que vamos a utilizar están capacitadas.

Normalmente se tienen tres tipos de fuerzas de corte: fuerza principal  $F_c$ , fuerza de penetración  $F_p$  y fuerza de avance  $F_a$ . La fuerza de corte  $F_c$ , que se necesita para mecanizar una pieza está en función de la resistencia del material, y de la sección de la

viruta en  $\text{mm}^2$  (avance por profundidad de pasada). Cada resistencia a la tracción necesita una fuerza específica.

$$F_c = f_{ec} \cdot s = f_{ec} \cdot a \cdot p \quad (2.2.1.2)$$

Donde  $F_c$  (N) es la fuerza de corte,  $f_{ec}$  es la fuerza específica de corte ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ),  $a$  el avance ( $\text{mm}/\text{mim}$ ),  $p$  la profundidad (mm) de pasada y  $s$  ( $\text{mm}^2$ ) la sección de viruta.

Para calcular la fuerza específica de corte,  $f_{ec}$ , se utiliza la fórmula de Kronember, que indica unos valores  $K$  en función de la  $R$ .

$$f_{ec} = \frac{K}{\sqrt[m]{s}} \quad (2.2.1.3)$$

Donde  $f_{ec}$  es la fuerza específica de corte ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ),  $K$  es un constante,  $s$  la sección de viruta ( $\text{mm}^2$ ) y  $m$  es otra constante que se muestra en la tabla 2.2.2.4.

**Tabla 2.2.2.4:** Valores para calcular la  $f_{ec}$

	En aceros:					
R=Resistencia	40	50	60	70	80	100
Valor de K	200	225	278	317	367	450
Valor de m	8					

Fuente: (Tecnología de Fabricación, 2008)

La potencia de corte es el producto de la velocidad por fuerza. En una máquina la potencia suele ser constante y es simplemente la potencia del motor incrementada o disminuida según sea el número de rpm. Por tanto, se hablará de potencia de corte absorbida durante el mecanizado y sería la fuerza de corte por la  $V_c$  en  $\text{m}/\text{min}$ .

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60 \cdot 75} = \frac{f_{ec} \cdot a \cdot p \cdot V_c}{60 \cdot 75} \quad (2.2.1.4)$$

Donde  $F_c$  es la fuerza de corte (N),  $f_{ec}$  la fuerza específica de corte ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ),  $a$  el avnace ( $\text{m}/\text{min}$ ),  $p$  la profundidad de pasada (mm),  $s$  la sección de viruta ( $\text{mm}^2$ ) y  $V_c$  la velocidad de corte ( $\text{m}/\text{min}$ ).

A partir de esta fórmula y sabiendo el rendimiento de las máquinas se sabrá la potencia necesaria que necesitará el motor.

$$P_m = \frac{P_c}{r} \quad (2.2.1.5)$$

Donde  $P_m$  es la potencia del motor (kW),  $P_c$  la potencia de corte (kW) y  $r$  el rendimiento del motor.

Para el taladro utilizaremos otras fórmulas, similares a las anteriores pero con algún concepto nuevo como el diámetro de la broca.

$$P_c = \frac{A_c \cdot p \cdot f \cdot F_c}{60 \cdot 10^6 \cdot \rho} \quad (2.2.1.6)$$

Donde  $P_c$  es la potencia de corte (kW),  $A_c$  es el diámetro de la broca (mm),  $p$  es la profundidad de pasada (mm),  $F_c$  la fuerza específica de corte (N/mm<sup>2</sup>) y  $\rho$  el rendimiento de la máquina.

**Tabla 2.2.2.5:** Potencias de máquinas

Máquina	Potencia (kW)
Torno paralelo	1.1
Taladro de columna Jet	0.25

*Fuente: (Elaboración propia)*

#### Tiempo de corte

Para definir el tiempo de corte partimos de la fórmula matemática de la velocidad que es una distancia recorrida entre el tiempo. En términos mecánicos hablaremos de longitud mecanizada y avance.

$$v = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (2.2.1.7)$$

Donde  $v$  es la velocidad (m/s),  $\Delta m$  variación de distancia (m) y  $\Delta t$  variación del tiempo.

A partir de la fórmula encontramos el tiempo de corte:

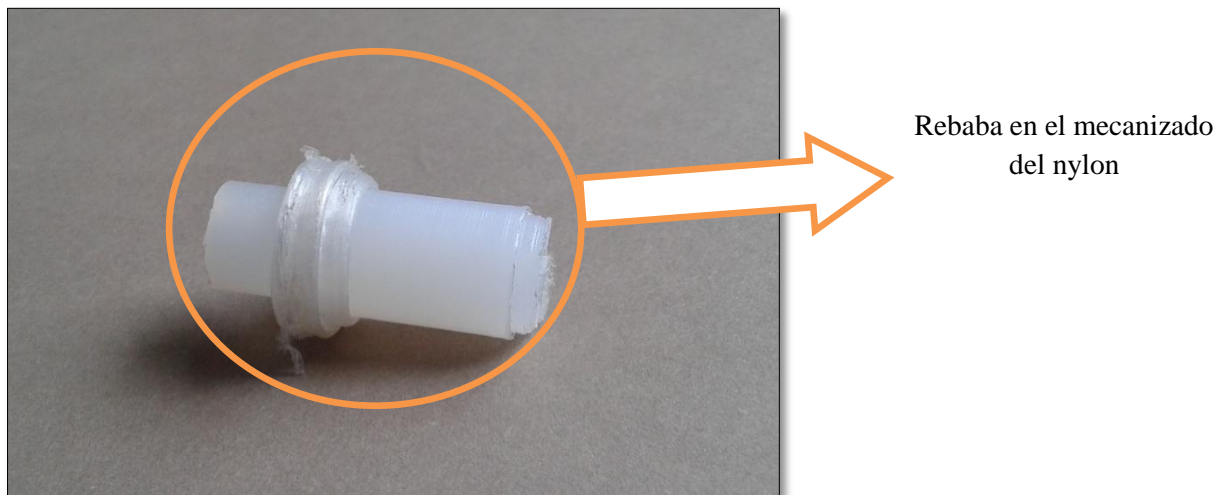
$$T_c = \frac{L_m}{a \cdot N} \quad (2.2.1.8)$$

Donde  $T_c$  es el tiempo de corte (s),  $L_m$  la longitud a mecanizar (mm),  $a$  avance (mm/min) y  $N$  (rpm) las revoluciones a las que funciona la máquina.

### 2.2.3 Mecanizado

En el siguiente apartado se va a mostrar cómo ha sido el proceso de fabricación de las piezas mecanizadas. También se comentarán detalles e inconvenientes que han aparecido en el mecanizado.

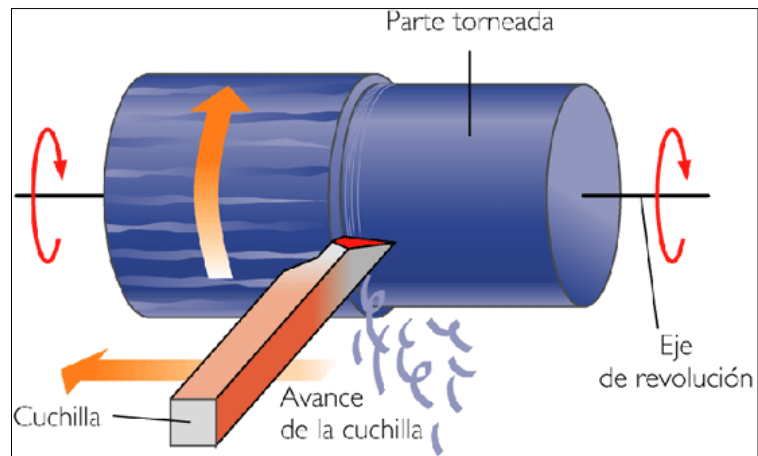
Para empezar se hablará del mecanizado de las piezas de nylon que son la mayoría de presente proyecto. Cabe destacar que en el mecanizado del nylon (PA6) surgieron problemas, ya que no se disponía al inicio de una herramienta adecuada para trabajar con este material. Trabajar por arranque de viruta con un material como el plástico requiere de velocidades específicas de corte, avance y herramientas de corte especial. Al cilindrar el nylon se creaban rebabas y el material tendía a fundirse sobre la parte cilindrada o la herramienta.



*Figura 2.2.3.1.* Detalle del mecanizado de nylon.

Las operaciones que se han realizado son principalmente punteado, cilindrado, ranurado, taladro y tronzado de las piezas.





**Figura 2.2.3.2.** Cilindrado en torno.

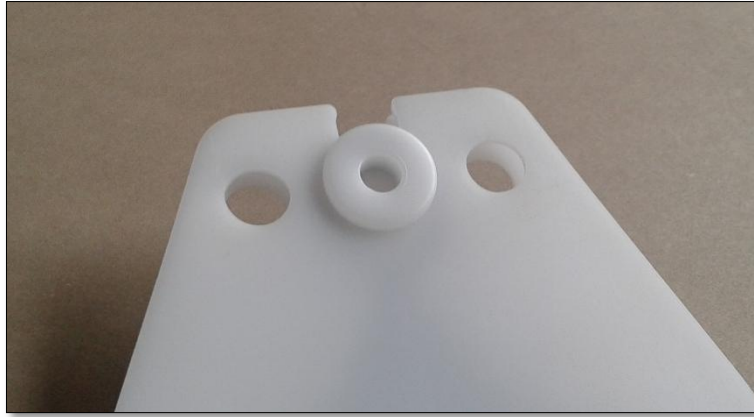
Para la sujeción del pulmón *Maquet* se diseñaron y fabricaron unas escuadras y unos pasadores con tope para garantizar su fijación a la estructura.



**Figura 2.2.3.3.** Pasador y tapa del pasador para sujetar el pulmón.



**Figura 2.2.3.4.** Escuadras para sujetar el pulmón.



**Figura 2.2.3.5.** Agujeros en el pulmón Maquet por donde los pasadores y las escuadras sujetarán y fijarán el pulmón a la estructura.

Continuando con los detalles de la sujeción del pulmón, se diseñó y fabricó las bases de la estructura, una para instalar el motor y los engranajes y otra por donde el pulmón se introducirá y sujetará, además de la sujeción de los pasadores como se ha señalado anteriormente.



**Figura 2.2.3.6.** Obertura en la madera contrachapada por donde se introduce, centra y fija el pulmón.

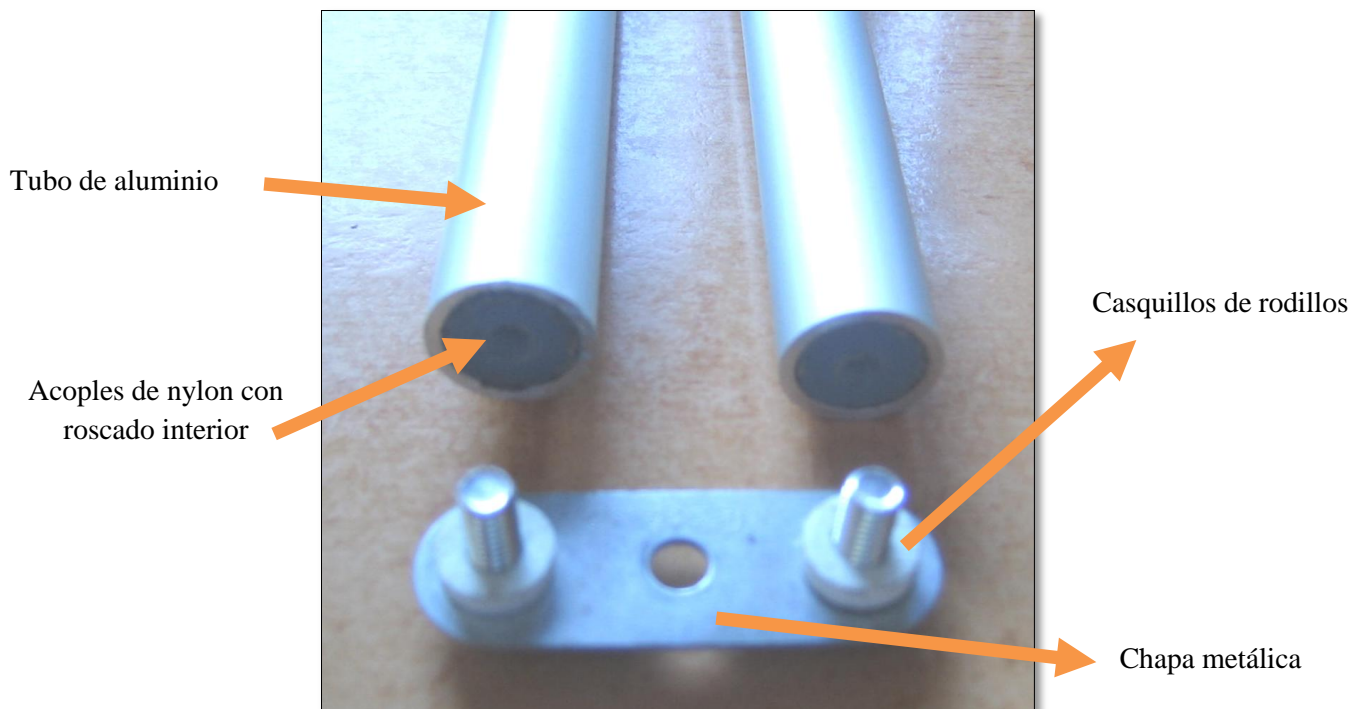
A continuación se mostrará las partes de la guía y regulación de la compliancia que se realiza a través de una varilla roscada M5, unos casquillos guía introducidos en la madera contrachapada, una pieza cilíndrica introducida en la varilla que se ha denominado tuerca deslizable y los rodillos que determinarán la compliancia del pulmón en diferentes posiciones.

El casquillo se fabrica con un cilindrado exterior a 8mm y un taladro pasante de diámetro 5.2mm para que puedan guiar a las varillas roscadas.

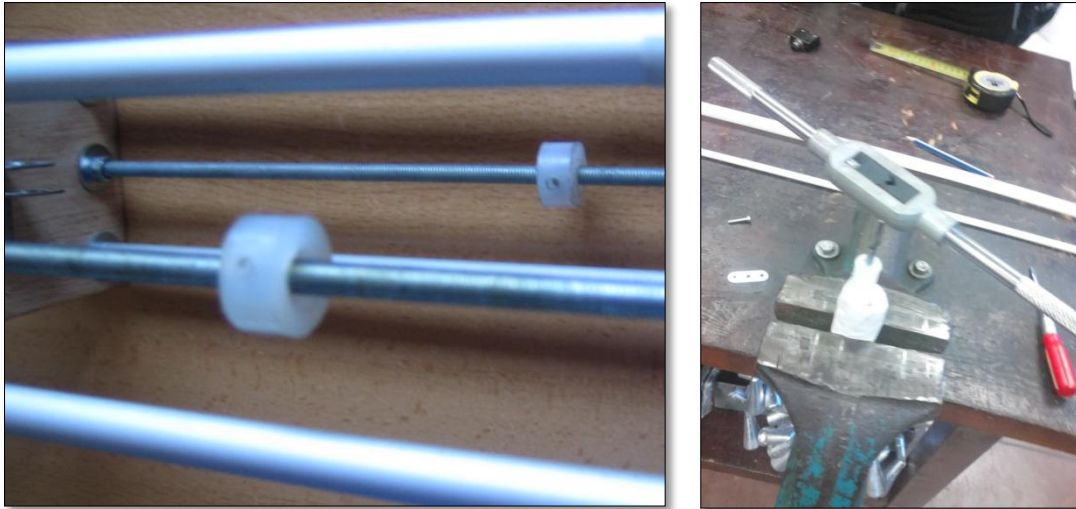


**Figura 2.2.3.7.** Casquillo guía de varillas.

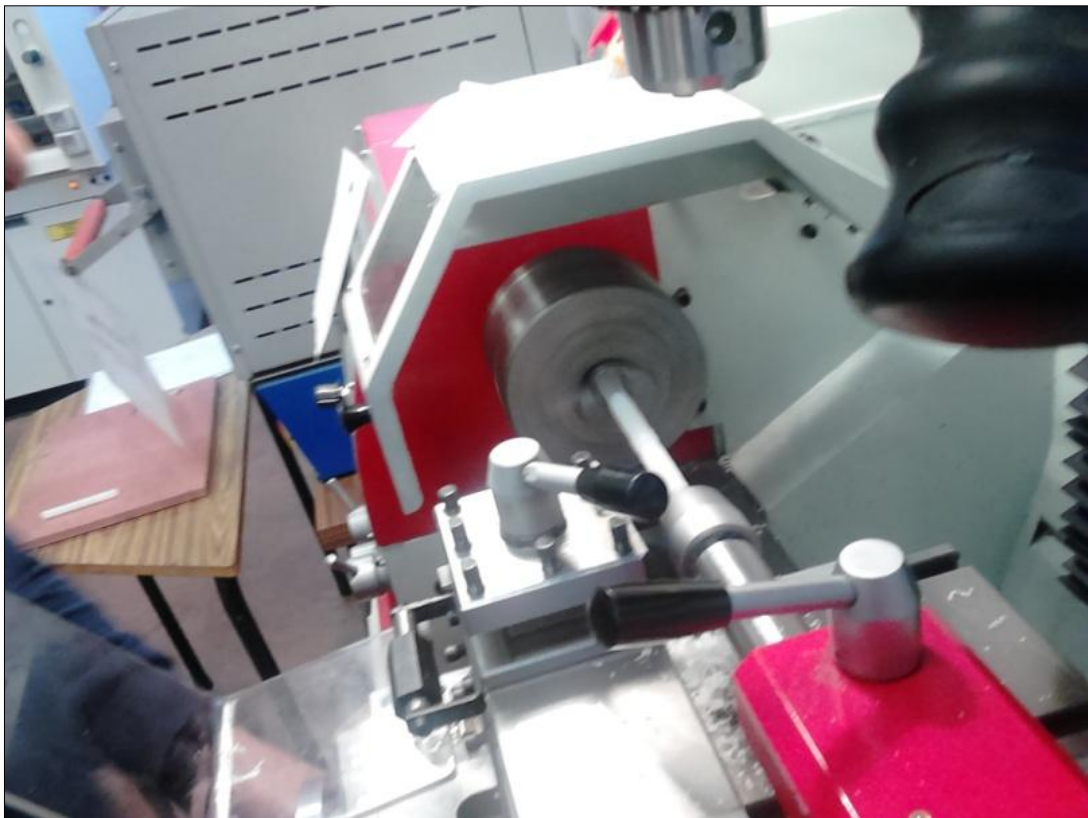
El subconjunto de los rodillos está formado por dos tubos de aluminio de diámetro exterior 13mm y de interior 11mm. Dentro ajustado al diámetro interior del tubo hay dos acoples de nylon con un roscado interior de M4 que gracias a la chapa metálica unirán la tuerca deslizable y los rodillos.



**Figura 2.2.3.8.** Rodillos y sus componentes del subconjunto.



**Figura 2.2.3.9.** Tuerca deslizable en la varilla roscada. Detalle del roscado interior de la tuerca deslizable.



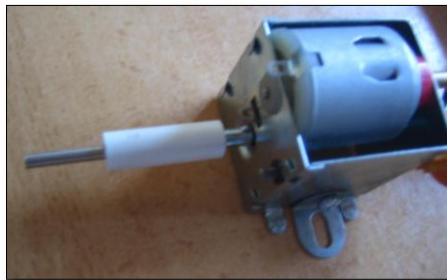
**Figura 2.2.3.10.** Mecanizado de la tuerca deslizable, cilindrado exterior.





**Figura 2.2.3.11.** Técnicos realizando el mecanizado de las piezas de torno.

Para finalizar con lo que se refiere al mecanizado de piezas de nylon se diseñó y mecanizó un acople que uniera el eje de salida del motor reductor con el eje del diámetro interior del tornillo sin fin. El mecanizado consta de dos taladros de diferentes diámetros con diferentes profundidades que garantizan el contacto entre rueda dentada y tornillo sin fin.



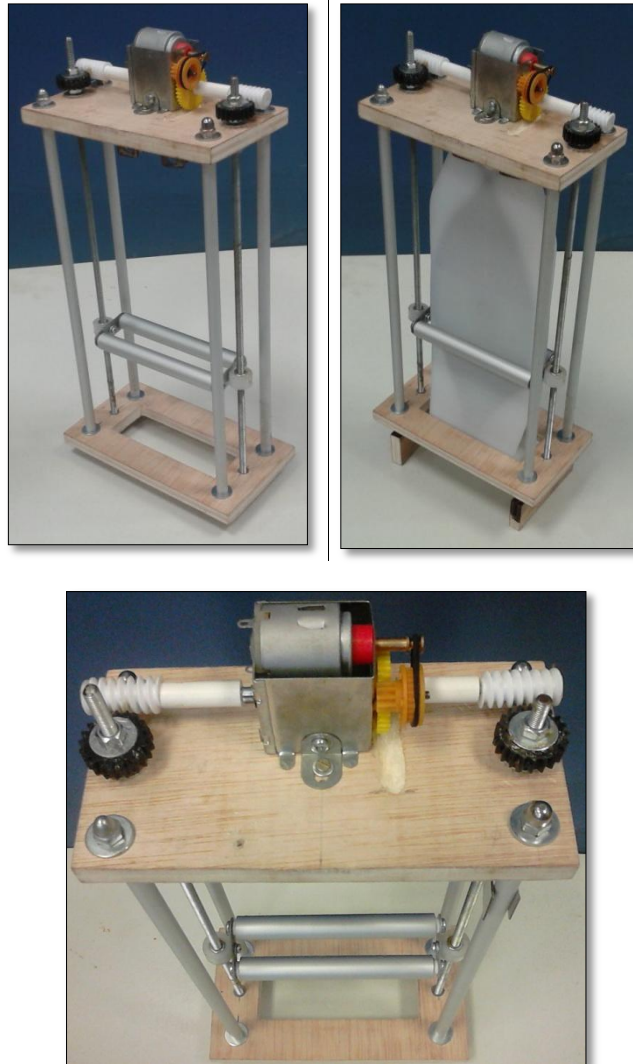
**Figura 2.2.3.12.** Acople introducido en eje de salida del motor.



**Figura 2.2.3.13.** Acople con salida hacia tornillo sin fin.

### 2.3 Evaluación del mecanismo

Con la fabricación del primer diseño propuesto se procedió a la evaluación. Se conectó el motor a dos pilas de 1,5V cada una y se observó el movimiento de los rodillos. El mecanismo funcionaba correctamente pero era muy lento el avance de las tuercas deslizables.



*Figura 2.3.1.* Prototipo resultante del primer diseño.

Se llegó a la conclusión de que la causa de éste problema era la relación de transmisión entre el tornillo sin fin y la rueda dentada ya que había una reducción de  $1/20$  (determinada en la tabla 2.1.2), además del rozamiento que había entre la tuerca deslizante y la varilla roscada.

Por este motivo se planteó el rediseño del prototipo para eliminar el problema encontrado en el movimiento de la tuerca deslizante, del cual dependen los rodillos.

## 2.4 Rediseño

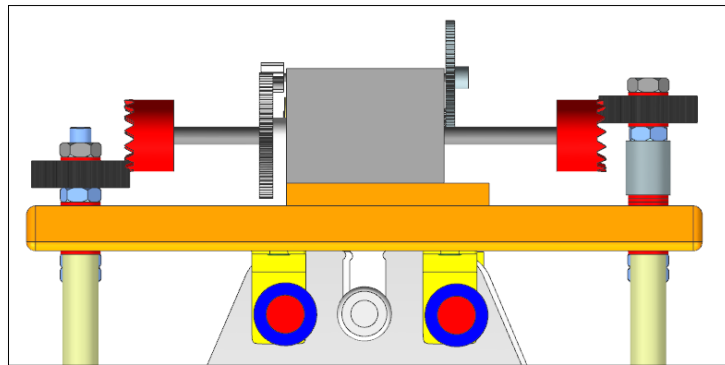
Después de la evaluación del primer prototipo se obtuvo que había problemas con la velocidad en el desplazamiento de la tuerca deslizante. Este problema tenía dos causas:

1. La relación de transmisión entre el tornillo sin fin y la rueda dentada.
2. El rozamiento entre la tuerca deslizante y la varilla roscada.

### Primera causa:

La primera causa era la relación de transmisión entre el tornillo sin fin y la rueda dentada. Como se comentó anteriormente, el surtido de engranajes comprado disponía de varias ruedas dentadas y engranajes. Se pensó que la mejor opción para transmitir el movimiento desde el eje del motor a la rueda dentada sería colocar la corona de 15 dientes.

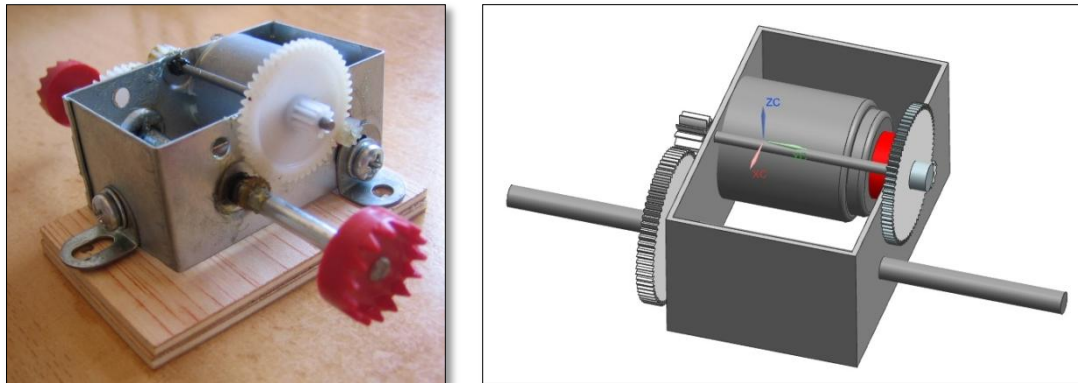
Además fue necesario cambiar de motor, ya que los ejes del anterior habían sido modificados. El nuevo motor incluye un mecanismo con ruedas dentadas con una reducción de 23:1. Eje de trabajo doble de 40 mm a cada lado y diámetro 4 mm. Funciona entre 1,5V y 12V (en principio lo deseable era cambiar por otro motor igual al del primer diseño, pero por motivos de stock en el establecimiento donde se compraron, no se pudo adquirir el mismo).



*Figura 2.4.1.* Nuevo montaje con los nuevos componentes.

Como se puede observar en la imagen anterior, al cambiar el motor y colocar las coronas, fue necesario añadir una base para elevar el motor y alinear las coronas con las ruedas dentadas. También se diseñaron unos casquillos para aumentar la altura de una de las ruedas dentadas, para hacer girar las varillas en el mismo sentido.

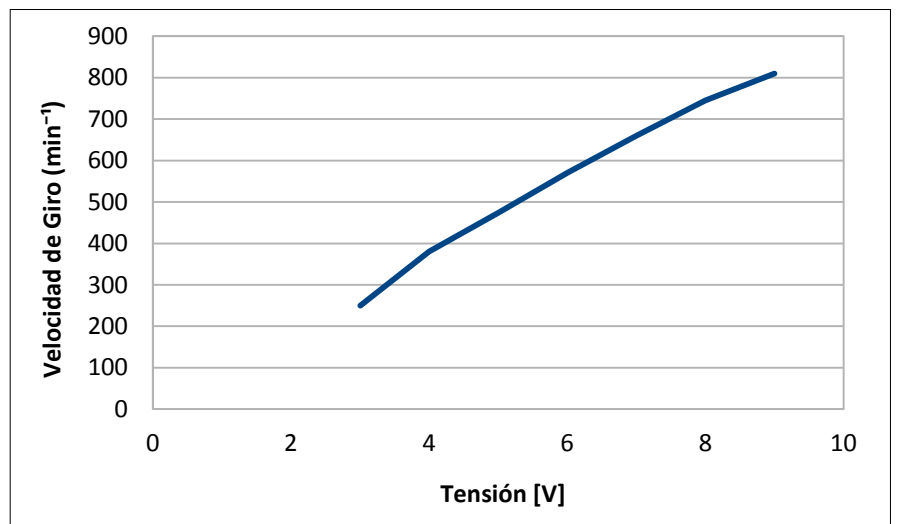
Con los cambios realizados se procedió al cálculo de la nueva velocidad de avance de las tuercas deslizables.



**Figura 2.4.2.** Fotografía del motor utilizado en el rediseño. Imagen CAD 3D del motor.

**Tabla 2.4.1:** Velocidad de giro del motor en función de la tensión aplicada.

Tensión	Veloc giro
[V]	[Vueltas/min]
3	250
4	380
5	474
6	570
7	660
8	745
9	810



Para determinar la relación de transmisión entre la corona y la rueda dentada es necesario tener en cuenta la siguiente fórmula:

$$n_1 \cdot z_1 = n_2 \cdot z_2 \quad (2.4.1)$$

Donde: "n<sub>1</sub>" la velocidad del motor, "Z<sub>1</sub>" el número de dientes de la corona y "Z<sub>2</sub>" el número de dientes de la rueda dentada. Aplicando la formula se obtiene la velocidad de salida de la rueda dentada "n<sub>2</sub>".

Una vez obtenida la relación entre la corona y la rueda dentada, se procedió al cálculo del avance para la tuerca deslizable mediante el uso de la Fórmula 2.1.2.



**Tabla 2.4.2:** Relaciones de transmisión con nuevos componentes.

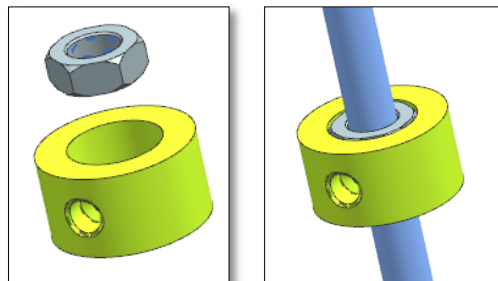
RELACIONES	
Corona + Rueda dentada (Fórmula 2.4.1)	$n_1 \cdot 15 = n_2 \cdot 20$ $\frac{3}{4} = n_2$
Paso de varilla roscada M5	$p = 0.8 \text{ mm}$
Avance de la tuerca deslizable [Motor a 3V = 250 rpm] (Fórmula 2.1.2)	$A = 0.8 \cdot \frac{3}{4} \cdot 289$ $A = 150 \text{ mm/min}$

Por lo que se obtuvo que los rodillos tendrían un avance de 150 mm/min, o lo que es lo mismo 2.5 mm/s, observando que la velocidad de avance aumentaría en 90 %.

#### **Segunda causa:**

Al montar la tuerca deslizable al mecanismo, se empezó a observar que costaba introducirla. Cuando se realizaron las pruebas con el motor se comprobó que efectivamente había mucho rozamiento entre la tuerca deslizable y la varilla roscada. Por esto se pensó en una solución práctica y sencilla para eliminar esta causa.

La solución al problema consistió en realizar un taladro de mayor diámetro en la tuerca deslizable para poder incrustar una tuerca convencional de ferretería. De esta manera, la acción de roscar sería mucho más fácil y permitiría que los rodillos se muevan sin dificultad.

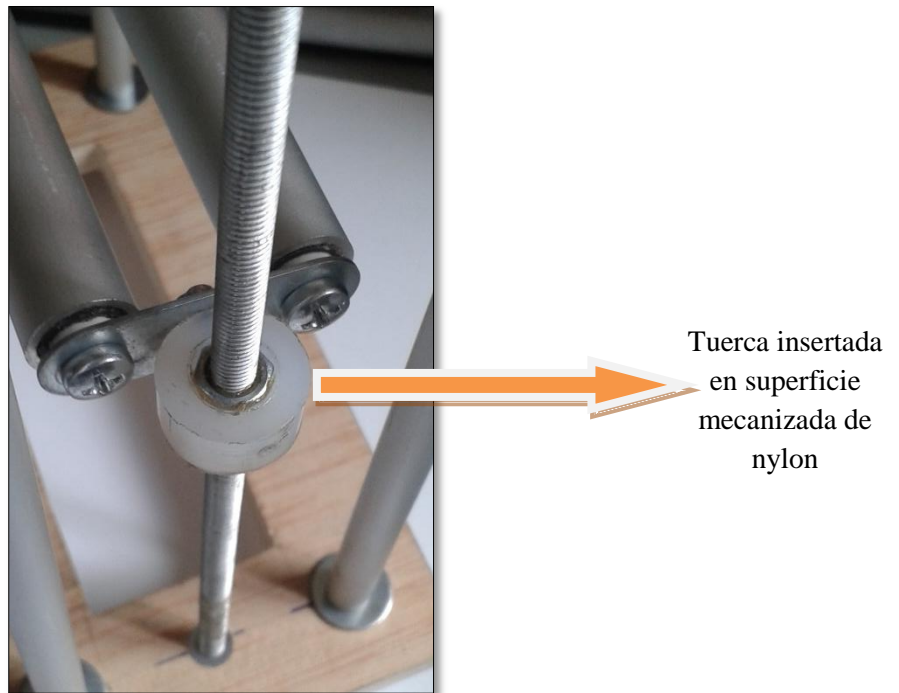


**Figura 2.4.3.** Rediseño tuerca deslizable.

### 2.4.1 Mecanizado

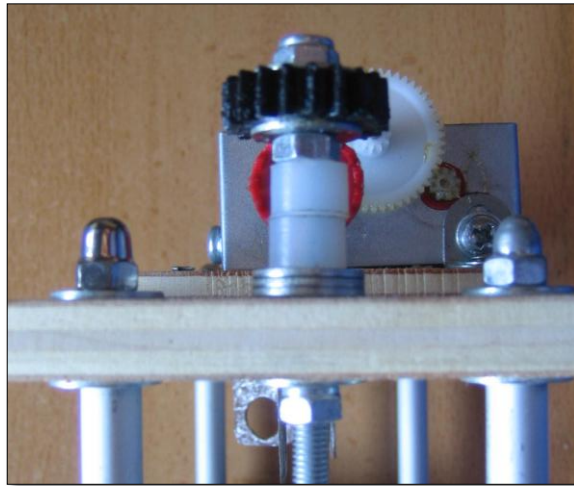
Para el segundo diseño se han tenido que modificar e incorporar nuevas piezas para mejorar sus prestaciones. Las nuevas piezas son: tuerca deslizante modificada, madera elevación motor y casquillo para elevar la rueda dentada.

En la tuerca deslizante se ha tenido que realizar un taladro de 9 mm de diámetro e incrustar una tuerca de M5 para desplazarse a través de la varilla roscada. Con esta modificación se mejora el desplazamiento de la tuerca deslizante.



*Figura 2.4.1.1.* Rediseño tuerca deslizante.

Con lo que respecta al motor reductor y el juego de engranajes se tuvo que introducir unos casquillos para dar la altura necesaria a la rueda dentada, para que las dos ruedas girasen en el mismo sentido. El mecanizado consta de un cilindrado de 10mm de diámetro por 12mm de largo y un taladro de 5.2mm de diámetro para introducirlo en la varilla roscada.



*Figura 2.4.1.2.* Casquillo para dar altura a la rueda dentada.

También hay que añadir en el apartado del motor la madera de elevación para que las ruedas dentadas que lleva incorporadas para conseguir la reducción, rozaba con la base de madera. Para fabricar se trazó en un plancha de madera contrachapada un rectángulo de 67.5mm de largo 44.5mm de ancho y 5mm de alto.



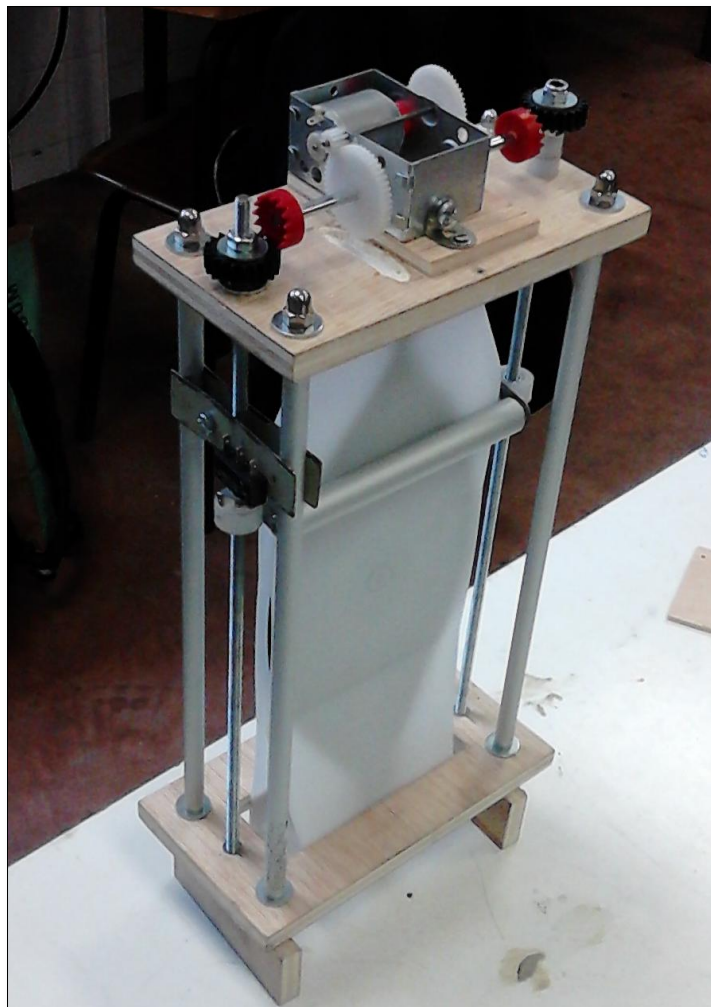
*Figura 2.4.1.3.* Elevación de madera para motor (2).

## 2.5 Evaluación 2 del mecanismo

Una vez realizadas las modificaciones, se procedió a evaluar el mecanismo. Nuevamente se conectó el motor a dos pilas de 1,5V cada una, destacando lo siguiente:

El movimiento de los rodillos era más rápido al realizar los cambios en el diseño. A pesar de ser un motor con mayor reducción (23:1), al utilizar las coronas la velocidad de avance de los rodillos aumentó de 0.27mm/s a 2.89mm/s. Además, con las tuercas convencionales incrustadas en las tuercas deslizables, se consiguió que las varillas roscadas giren con mayor libertad.

Por lo que una vez evaluado el rediseño del mecanismo, y comprobando el correcto funcionamiento, se pudo proceder al siguiente bloque del proyecto. Automatizar el mecanismo de movimiento de los rodillos.



*Figura 2.5.1.* Prototipo obtenido del rediseño.

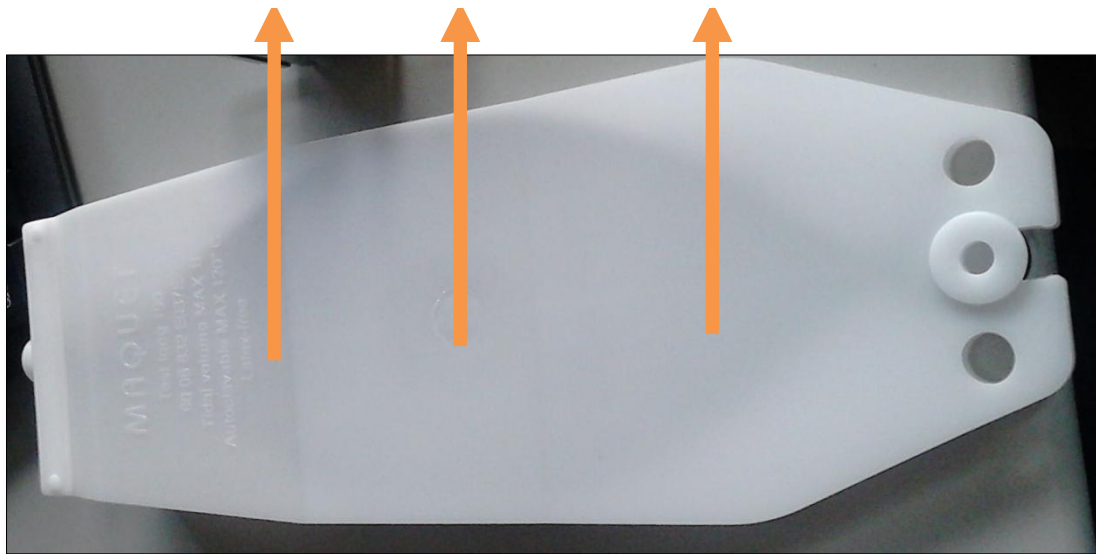
### 3. Segundo Bloque: Automatización del mecanismo

En este segundo bloque se explicará la propuesta de automatización del mecanismo que se ha diseñado y fabricado anteriormente, ya que es uno de los objetivos principales del presente proyecto, para facilitar la simulación de las variaciones de la compliancia pulmonar.

#### 3.1 Propuesta de automatización

Para llevar a cabo la automatización se ha decidido utilizar el hardware Arduino con el que se programarán las condiciones que se requieren para las diferentes compliancias. En el diseño del circuito se ha introducido un controlador de motores con driver L293D que controlará la polaridad del motor. Además se introducirá un final de carrera para limitar el recorrido de los rodillos a través de las varillas roscadas.

*Diferentes posiciones de los rodillos,  
representarán tres volúmenes distintos, que  
corresponden a compliancias diferentes que el  
simulador de pulmón tiene que realizar*



**Figura 3.1.1.** Simulador Maquet.

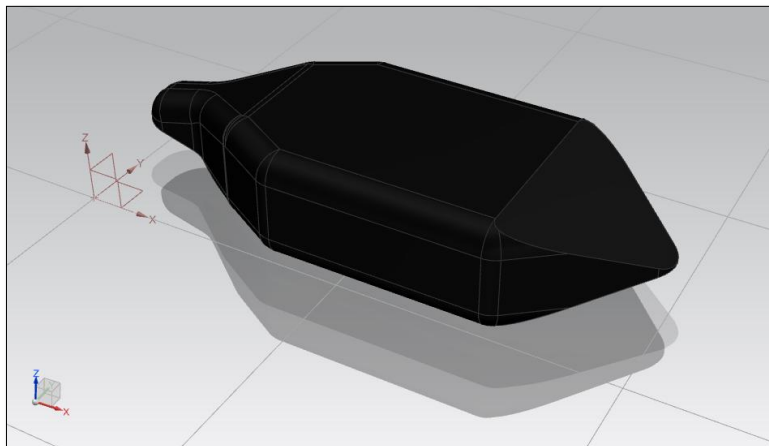
Para saber la relación entre la posición de los rodillos y el volumen que representan, se va a estimar, a través de la herramienta CAD Siemens NX, una figura 3D que representará el globo que simula el pulmón. Posteriormente esa distancia (mm) junto con el avance de la tuerca deslizable se utilizará para programar las condiciones del



programa para Arduino, a través del tiempo que tardará en recorrer las diferentes posiciones (volúmenes).

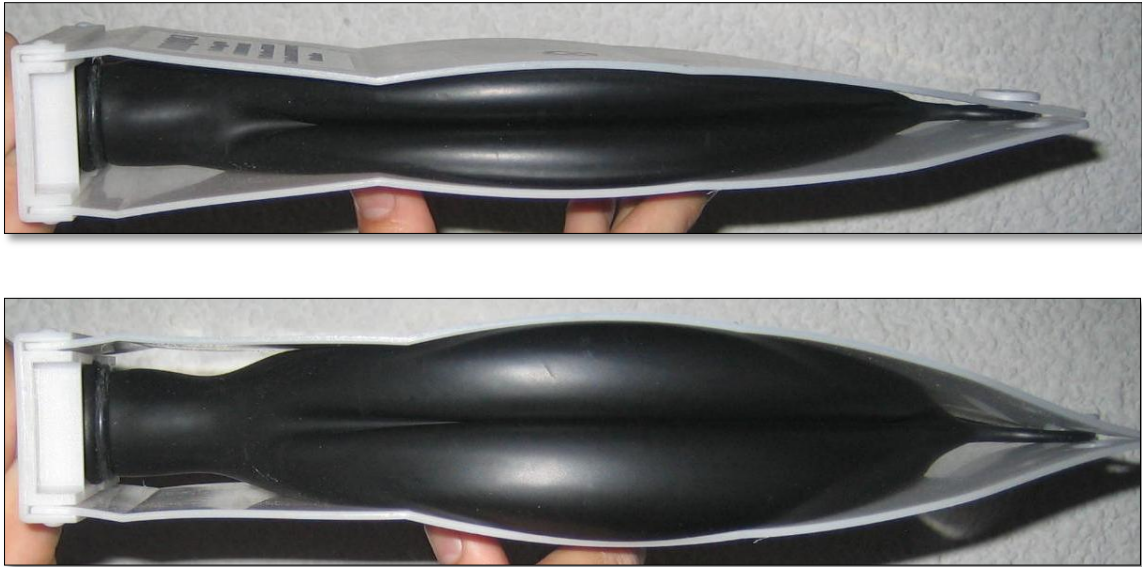


**Figura 3.1.2.** Simulador Maquet. Detalle del globo interior.



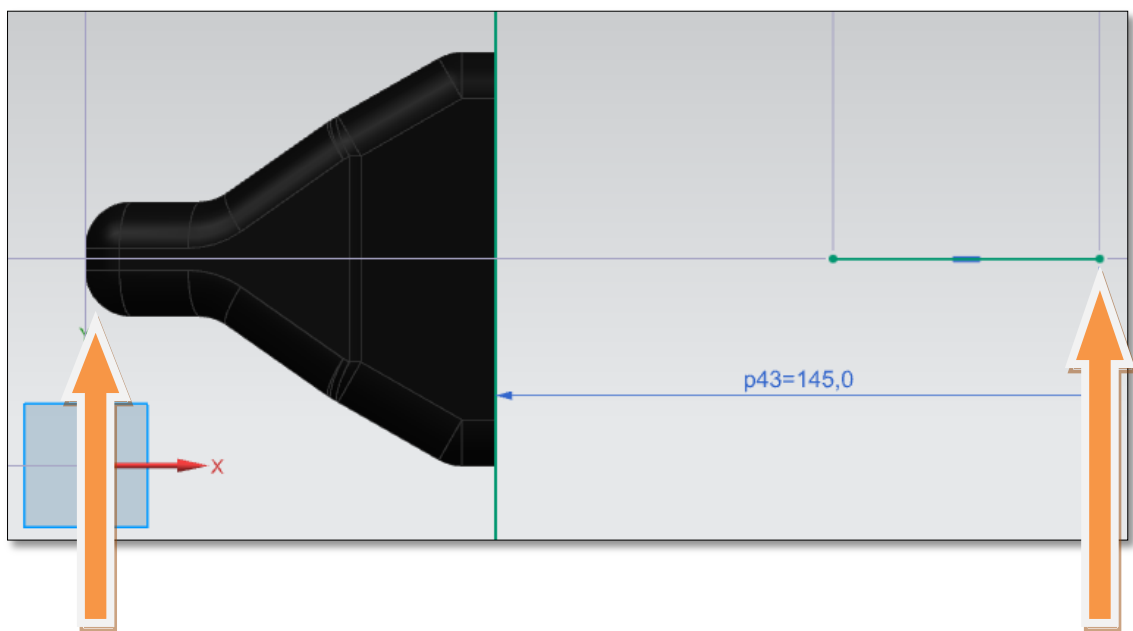
**Figura 3.1.3.** Estimación del globo en 3D.

Una vez modelado el globo estimado, se obtiene la estimación del volumen total que es de 724731,0321 mm<sup>3</sup> que equivalen a 724.7 cm<sup>3</sup>.



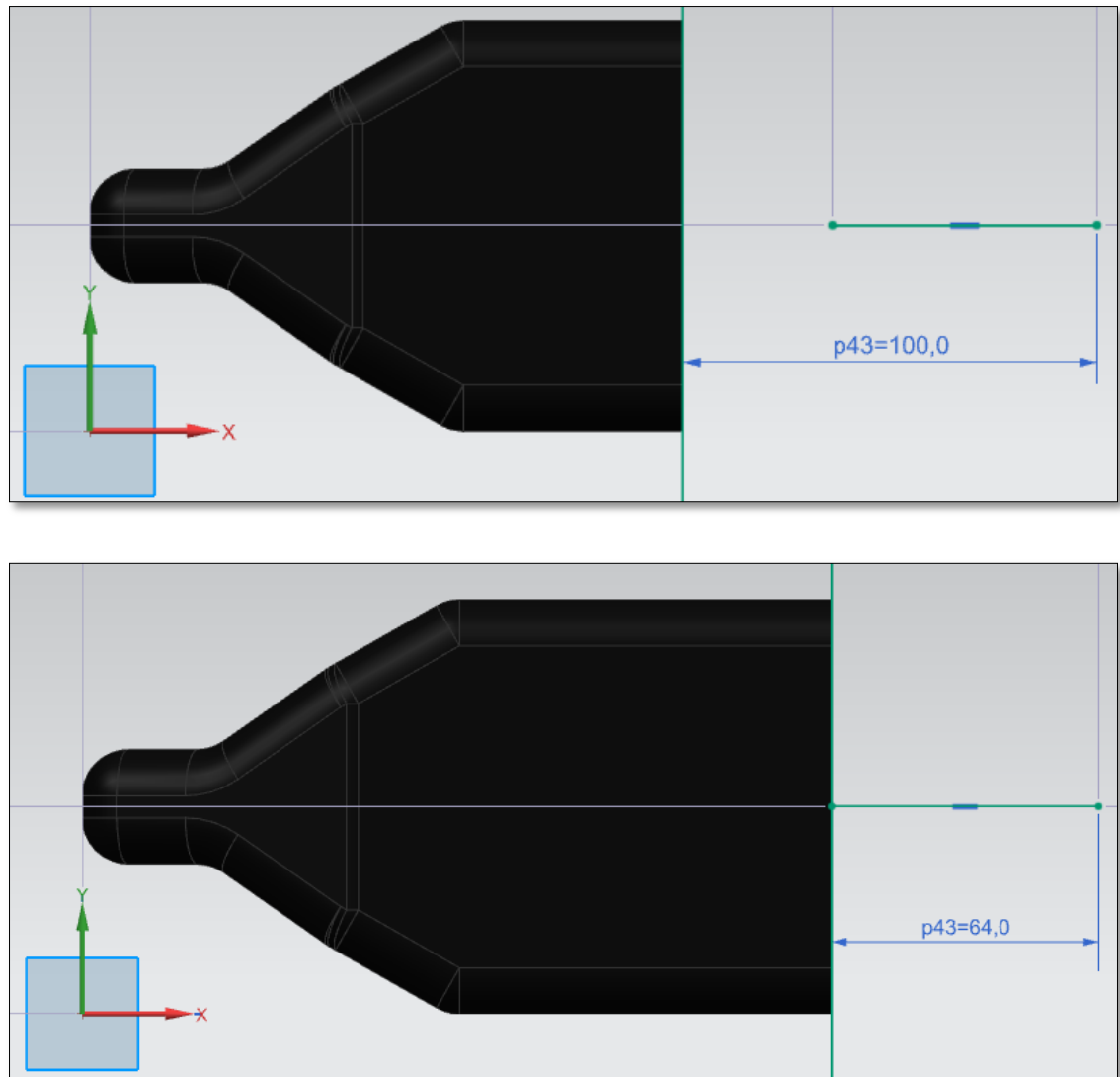
*Figura 3.1.4.* Globo con volúmenes diferentes.

Para simular las diferentes compliancias que se pueden representar con el pulmón se ha realizado cortes en el modelado 3D para estimar los diferentes volúmenes. En las siguientes imágenes se muestra los tres cortes realizados y la referencia que se toma, que es el final del globo. El corte simula donde estarán los rodillos.



Boquilla del pulmón (globo)

Posición final del pulmón (globo).  
Se toma como referencia para hacer  
el corte

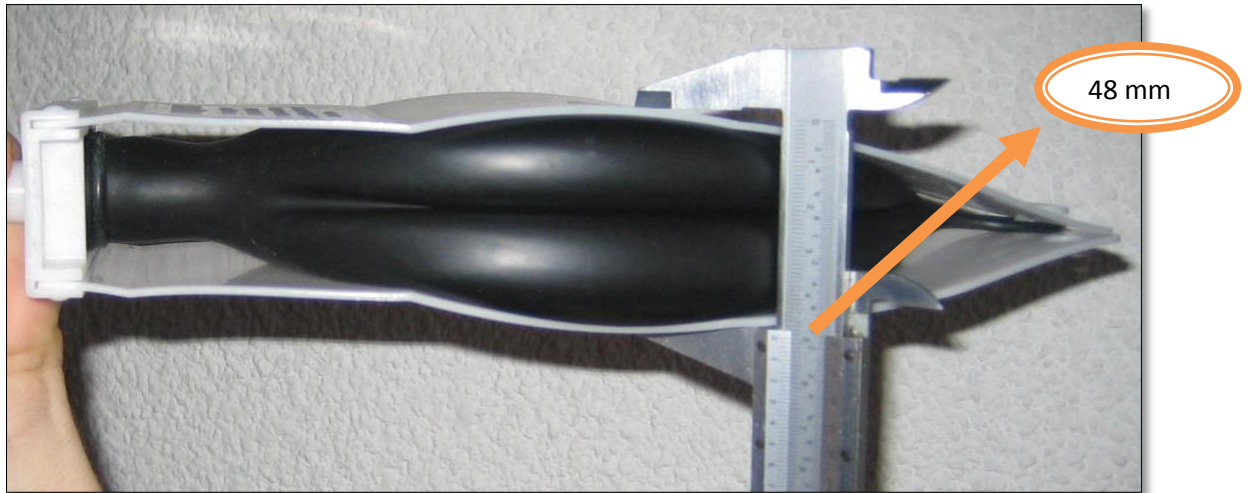


**Figura 3.1.5.** (a) Posición con volumen mínimo. (b) Posición intermedia de volumen. (c) Posición con máximo volumen del globo.

**Tabla 3.1.1** Relación de posiciones con volúmenes

Distancia (mm) (ref. posición final del globo)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
64	597,4
100	430,1
145	220,9





*Figura 3.1.6.* Máxima expansión del globo.

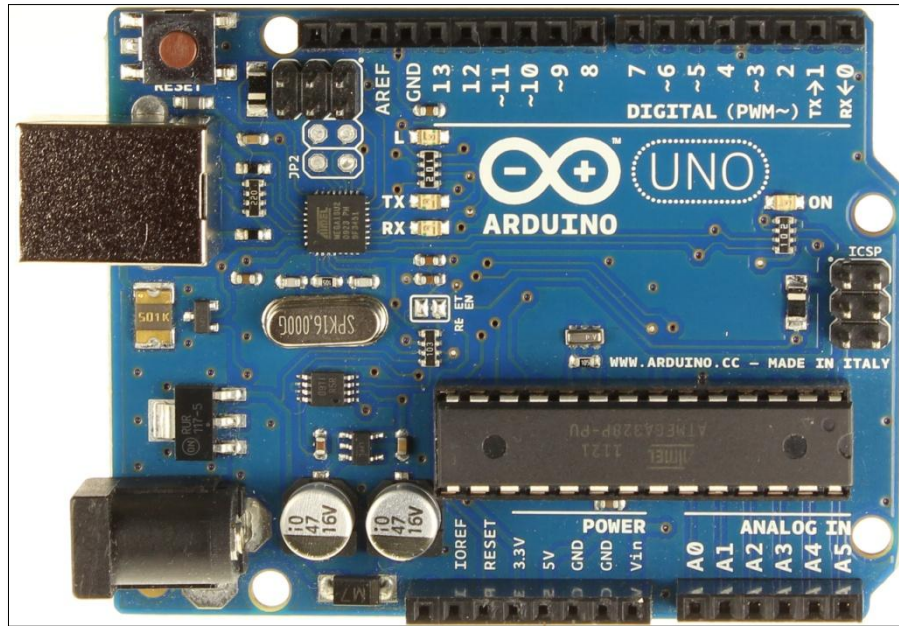
### 3.2 Definir componentes

A continuación se explicarán que son y qué características técnicas tienen los componentes electrónicos introducidos.

#### Arduino

Es una plataforma de prototipos electrónica de código abierto (open-source) basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar. Está pensado para artistas, diseñadores, como hobby y para cualquiera interesado en crear objetos o entornos interactivos.

Arduino puede sentir el entorno mediante la recepción de entradas desde una variedad de sensores y puede afectar a su alrededor mediante el control de luces, motores y otros artefactos. El microcontrolador de la placa se programa usando el *Arduino Programming Language* (basado en Wiring) y el *Arduino Development Environment* (basado en Processing). Los proyectos de Arduino pueden ser autónomos o se pueden comunicar con software en ejecución en un ordenador (por ejemplo con *Flash*, *Processing*, *MaxMSP*, etc.).



*Figura 3.2.1.*Placa Arduino.

Las placas se pueden ensamblar a mano o encargarlas preensambladas; el software se puede descargar gratuitamente. Los diseños de referencia del hardware (archivos CAD) están disponibles bajo licencia open-source, por lo que eres libre de adaptarlas a tus necesidades.

El entorno de programación de Arduino es fácil de usar para principiantes. Para profesores, está convenientemente basado en el entorno de programación Processing, de manera que estudiantes aprendiendo a programar en ese entorno estarán familiarizados con el aspecto y la imagen de Arduino.

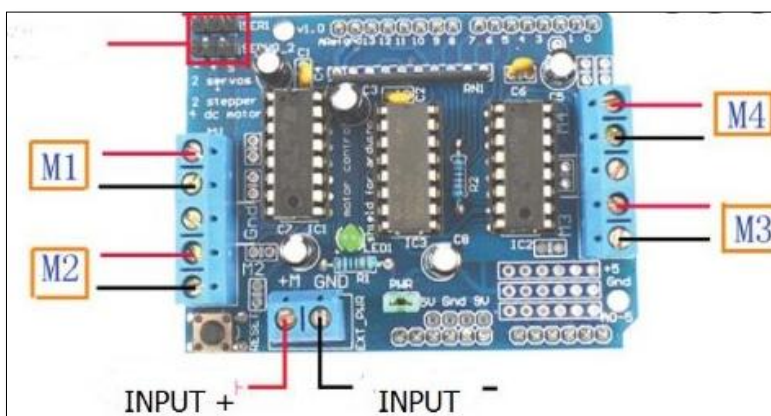
El software Arduino está publicado como herramientas de código abierto, disponible para extensión por programadores experimentados. El lenguaje puede ser expandido mediante librerías C++, y la gente que quiera entender los detalles técnicos pueden hacer el salto desde Arduino a la programación en lenguaje AVR C en el cual está basado. De forma similar, puedes añadir código AVR-C directamente en tus programas Arduino si quieres.

Arduino está basado en microcontroladores ATMEGA8 y ATMEGA168 de Atmel. Los planos para los módulos están publicados bajo licencia Creative Commons, por lo que diseñadores experimentados de circuitos pueden hacer su propia versión del módulo, extendiéndolo y mejorándolo. Incluso usuarios relativamente inexpertos pueden

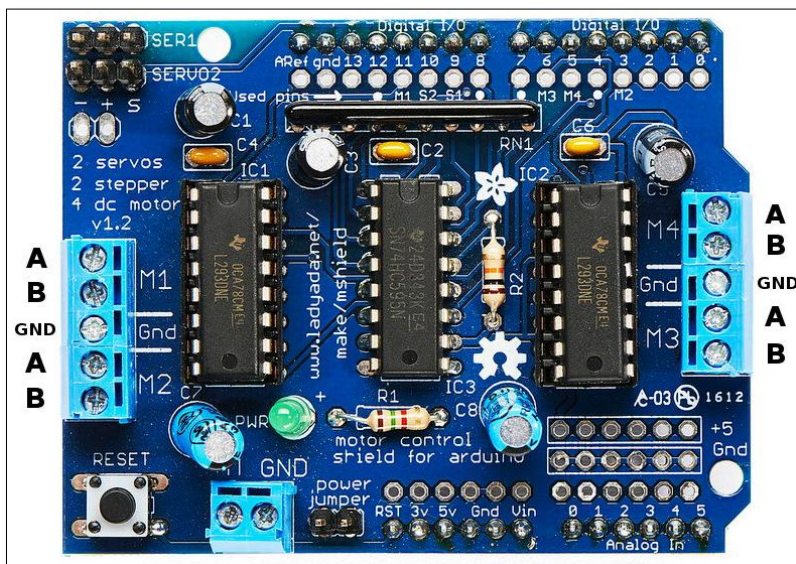
construir la versión de la placa del módulo para entender cómo funciona y ahorrar dinero. [3]

### Controlador de motor

Para controlar el motor que hará subir y bajar los rodillos por la varilla roscada, además de utilizar Arduino, se ha incorporado un controlador de motor SHD-MSTEPPER. Con este controlador se pretende además de controlar la polaridad del motor, proteger la tarjeta Arduino.



*Figura 3.2.2.*Esquema Arduino.



*Figura 3.2.3.* Controlador.

El controlador lleva incorporado el driver L293D. El dispositivo es un monolítico integrado de alta tensión, controlador de cuatro canales de corriente diseñado para

aceptar niveles lógicos TTL DTL o estándar y unidad cargas inductivas (como relés, solenoides DC y motores paso a paso) y transistores de conmutación de potencia. Para simplificar el uso como dos puentes cada par de canales está equipado con una entrada de habilitación. Este dispositivo es adecuado para su uso en aplicaciones de conmutación a frecuencias de hasta 5 kHz. El L293D tiene 4 pines centrales conectadas entre sí y se utiliza para disipar el calor. El L293DD se monta en una superficie de tiene 8 pines centrales conectadas entre sí y se utiliza para disipación de calor. [4]

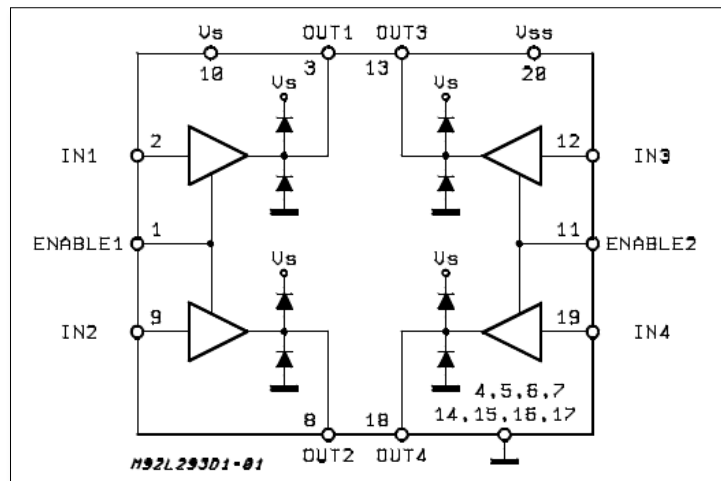


Figura 3.2.4. Diagrama del driver.

### Final de carrera

Para limitar el recorrido de los rodillos se instalará un final de carrera o interruptor límite permitirá a los rodillos cada vez que inicien su funcionamiento volver a la posición de inicio o de referencia. Se utilizará un controlador DB1.

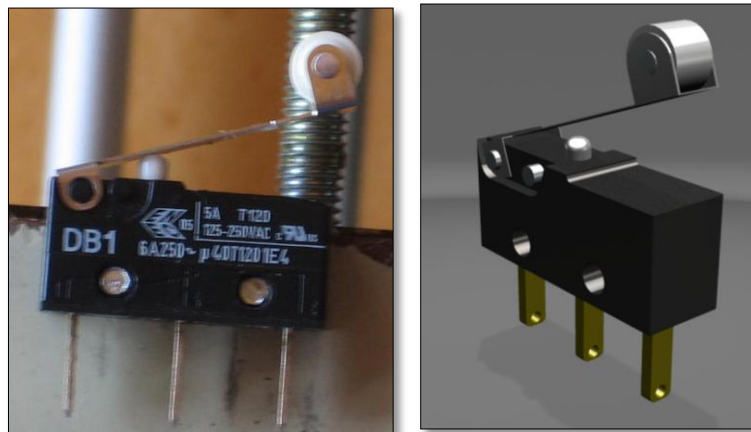


Figura 3.2.5. Final de carrera utilizado. Representación CAD 3D del final de carrera.



#### 4. Tercer Bloque: Diseño y fabricación de una válvula lineal de caudal de aire

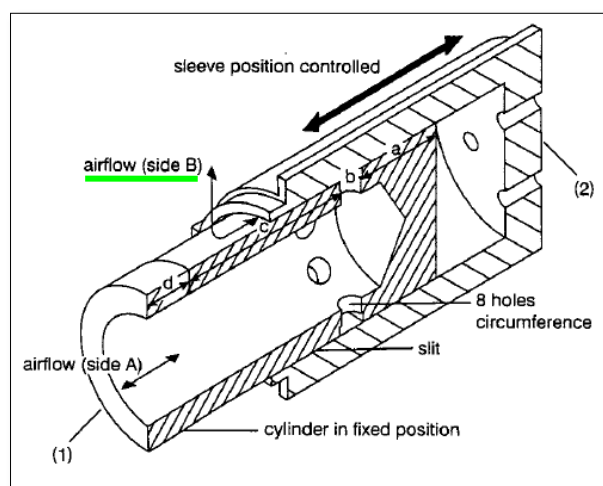
Éste bloque está compuesto por el diseño y fabricación de una válvula lineal de aire. Para ello se usarán herramientas CAD, y una vez obtenidos los planos, se fabricará en los laboratorios de la escuela.

##### 4.1 Diseño de la válvula

Otro parámetro a controlar en el simulador pasivo de pulmón es la variación de la resistencia en el flujo de aire. Para simular ésta condición fisiológica se ha diseñado una válvula lineal de caudal de aire.

La idea del diseño surge a partir del artículo "Computer-controlled flow resistance" (CCR) del departamento de medicina pulmonar del Hospital Universitario de Rotterdam [5], ya que se basa en la creación de una válvula con un comportamiento lineal. En éste artículo se propone el diseño de una válvula con las siguientes características:

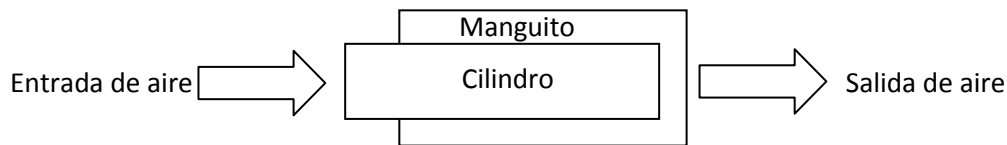
- Cilindro con tres secciones (a, c y d) con diámetros distintos y ocho agujeros para permitir el flujo del aire (en la sección b).
- Manguito con un movimiento axial a través del cilindro para variar el flujo del aire en la sección "c" del cilindro. En función de la distancia que tenga que recorrer el aire por la sección "c", la pérdida de carga será mayor o menor.
- Entrada y salida de aire por los lados "A" y "B".



**Figura 4.1.1.** Vista esquemática de la válvula del artículo "CCR".

Por lo tanto se parte de ésta idea principal pero con la necesidad de variar la posición de salida del aire. De esta manera poder adaptar la válvula al pulmón, ya que como se puede observar en la imagen anterior, el aire sale por el lado "B", y no sería posible.

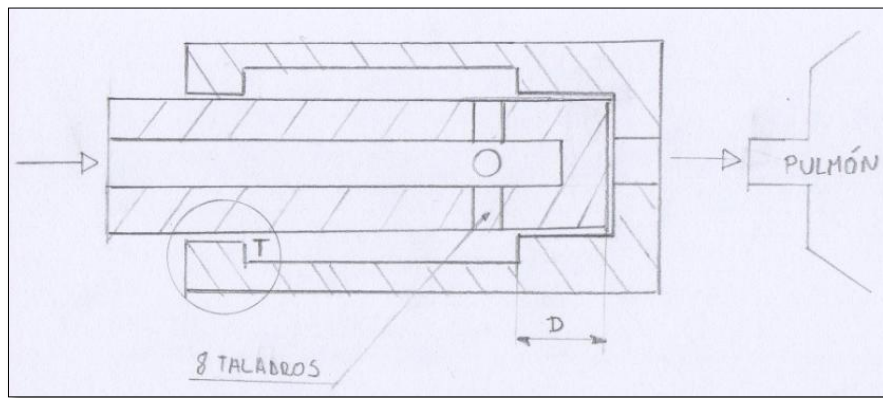
A continuación se detalla el esquema con la posición de la entrada y salida de aire necesarias para poder adaptar la válvula al pulmón.



**Figura 4.1.2.** Esquema de la entrada y salida del flujo de aire para la válvula.

Para poder implantar la condición de entrada y salida de aire, era necesario pensar en la manera de impedir el flujo de aire por lado "B" (de la válvula del artículo CCR), obligándolo a circular por el extremo del manguito.

De modo que se obtuvo el primero boceto de la válvula, en el cual se pueden destacar los siguientes aspectos:

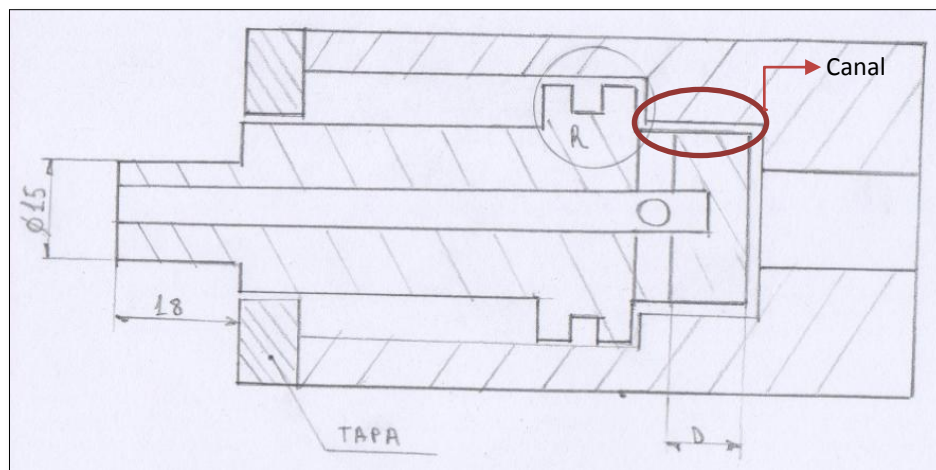


**Figura 4.1.3.** Primer boceto de los componentes de la válvula.

- El manguito sería la pieza con diferentes diámetros (a diferencia de la válvula del artículo CCR), y en la distancia "D" se encontraría el canal donde el aire pasará obstruido. Además se añadió un cambio de diámetro en la zona "T" para impedir el flujo del aire.
- El cilindro tendría un solo diámetro y ocho taladros por donde pasa el flujo de aire. Ésta pieza necesitaría llevar una junta tórica para evitar fugas de aire en la zona "T".

A partir del primer boceto y las medidas de la boca de entrada del pulmón, se empezó a detallar el diseño final de los componentes que forman la válvula, destacando lo siguiente:

- El manguito se dividió en dos piezas pensando en facilitar la fabricación. Resultaría más sencillo introducir una tapa que haga la función de bloqueo del flujo de aire, que no mecanizar un diámetro interior en el manguito.
- Como se comentó anteriormente, se añadió una zona "R" donde se mecanizará la ranura para la junta tórica, y evitar que el flujo de aire se escape hacia la tapa de la válvula. Además, dicha zona hará las funciones de tope del cilindro, para indicar que la válvula está completamente cerrada o abierta.



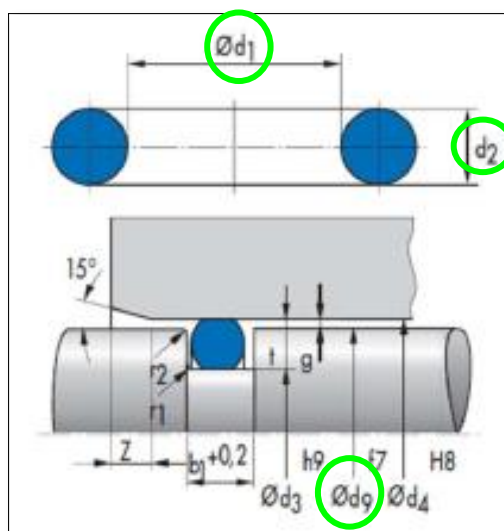
**Figura 4.1.4.** Boceto final con los componentes de la válvula.

Para dimensionar la ranura se parte de la siguiente expresión:

$$\varnothing_{Int} + \varnothing_{toro} * 2 > \varnothing_{d_9} \quad (4.1.1)$$

Donde:

- $\varnothing_{Int}$  es el  $\varnothing_{d_1}$  de la junta (obtenido por catálogo).
- $\varnothing_{toro}$  es el  $\varnothing_{d_2}$  de la junta (obtenido por catálogo).
- $\varnothing_{d_9}$  es el diámetro mayor del cilindro donde se diseñará la ranura.



**Figura 4.1.5.** Diseño de una ranura para estanqueidad neumática con movimiento axial.

En el boceto final (figura 4.1.4) se especificó que el diámetro menor del cilindro tendría que ser de 15mm, por lo que se determinó un espesor de 7mm para el diámetro mayor (zona "R"). De manera que aplicando la fórmula (4.1.1) se obtuvieron los siguientes resultados:

$$25mm + 2.65mm * 2 > 29mm$$

Por lo tanto será necesario una junta tórica de 25mm de Ø Int x 2.65mm de Ø toro. El resto de medidas de la ranura "t", "b1" y "Z", se obtienen mediante tablas normalizadas.

**Tabla 4.1.1:** Tabla con las medidas para el diseño de la ranura (Fuente: Apuntes JUNTES TÓRIQUES. Asignatura EXG2-EPSEVG).

d <sub>2</sub>	Nutttiefe t	Nutbreite b <sub>1</sub> + 0,2	Fase 15° Z
1,50	1,3 ±0,03	1,8	1,2
1,78	1,6 ±0,04	2,0	1,2
1,80	1,6 ±0,04	2,1	1,2
2,00	1,8 ±0,04	2,3	1,3
2,40	2,2 ±0,05	2,7	1,3
2,50	2,3 ±0,05	2,8	1,3
2,65	2,4 ±0,05	3,0	1,4
3,00	2,7 ±0,06	3,4	1,8

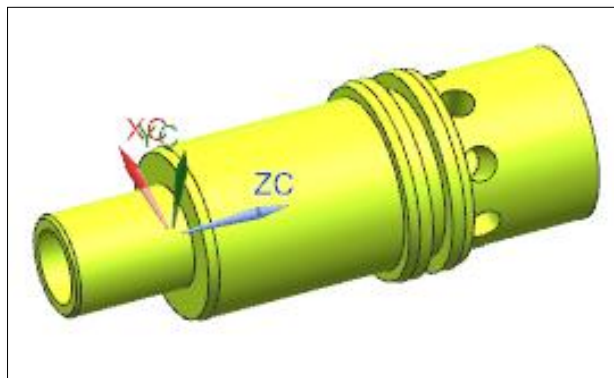


#### 4.1.1 Desarrollo del modelo 3D

Con los requerimientos para el diseño de la válvula y el boceto final mostrado en el apartado anterior, se procedió al modelado en 3D. Cabe destacar que en el "Anexo C" se podrán encontrar los planos detallados de cada componente.

##### Cilindro:

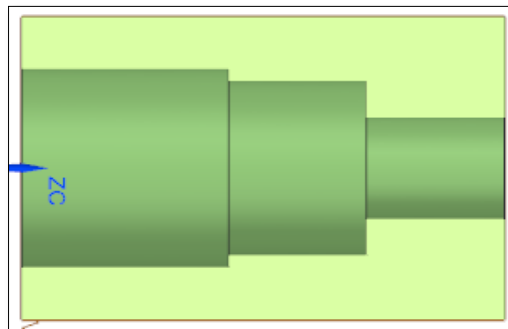
Como se comentó anteriormente, era necesario la implantación de una junta tórica para evitar fugas de aire en la válvula. Para ello se agregó una sección con diámetro mayor al cilindro ( $\varnothing 29\text{mm}$ ), para añadir la ranura donde irá la junta.



*Figura 4.1.1.1.* Imagen 3D del modelado del cilindro.

##### Manguito:

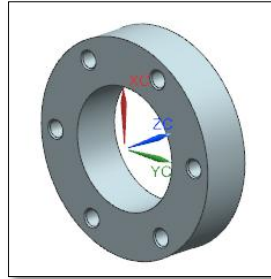
El manguito se diseñó con tres diámetros distintos. El diámetro menor es de 15mm, será donde se introducirá la boca del pulmón. El diámetro central, donde se reproducirá la pérdida de carga entre el cilindro y el manguito es de 25,5mm con una longitud de 20mm. La parte del cilindro que se introducirá en el manguito es de  $\varnothing 25\text{mm}$ , por lo que el espacio entre el cilindro y manguito será de 0.25mm.



*Figura 4.1.1.2.* Imagen 3D del modelado del manguito.

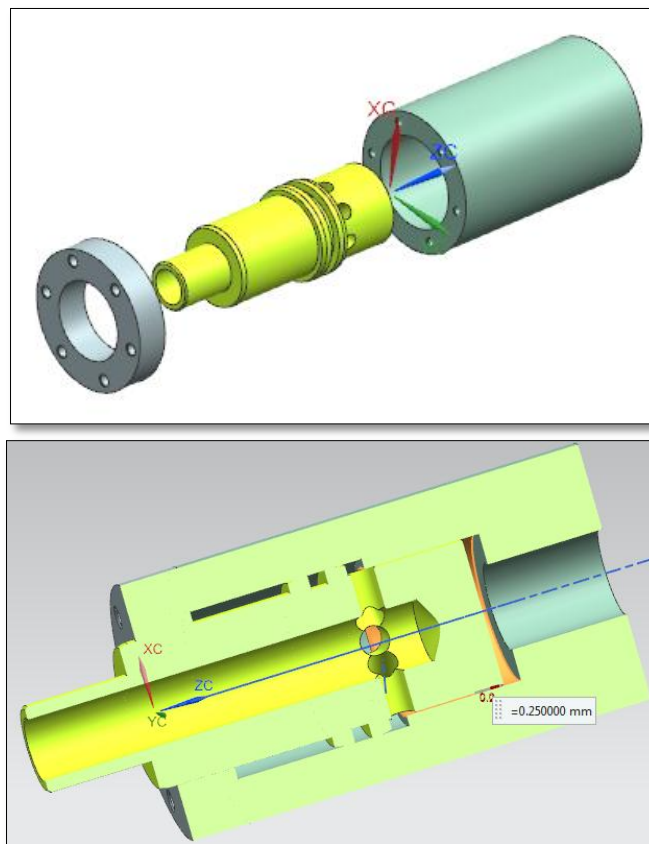
### **Tapa Manguito:**

La tapa manguito se añadió para evitar un mecanizado más complejo en el manguito y servirá de tope para indicar que la válvula está completamente abierta. Para el montaje al manguito, se utilizarán 6 tornillos M3 (DIN 912).



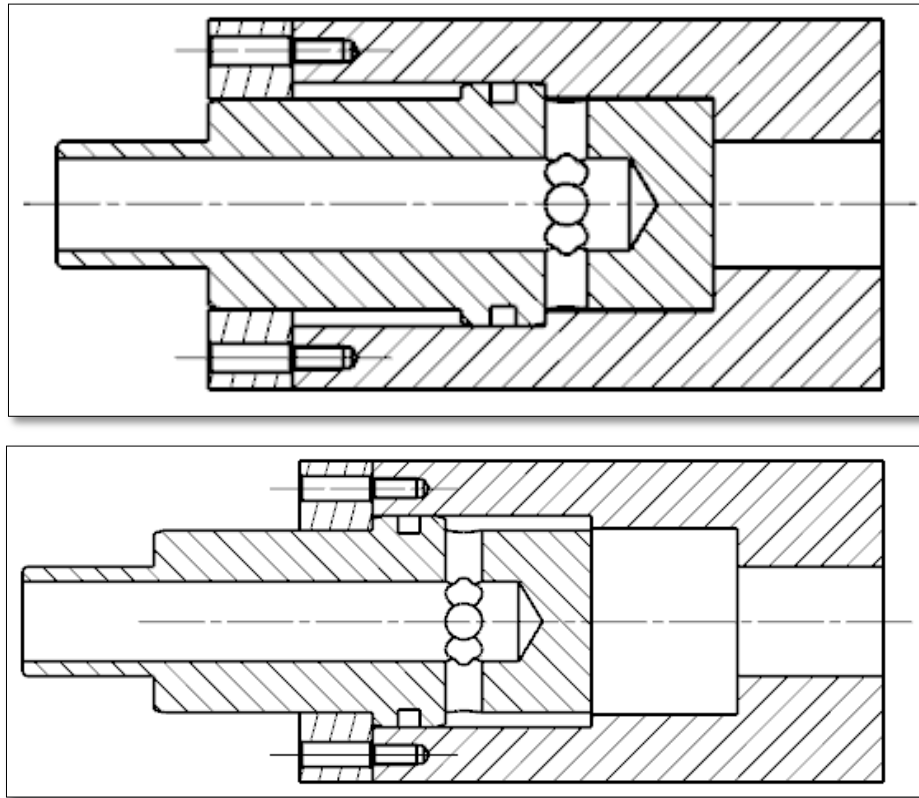
**Figura 4.1.1.3.** Imagen 3D del modelado de la tapa - manguito.

Finalmente se obtuvo el diseño en 3D de la válvula lineal de caudal de aire. En la figura 4.1.1.3 se puede observar el montaje del conjunto que forma la válvula. La vista seccionada muestra el canal existente entre el cilindro y el manguito (0.25mm).



**Figura 4.1.1.4.** Imagen 3D del modelado de válvula y sección mostrando el canal de 0.25mm de ancho (distancia entre el cilindro y el manguito).

En la figura 4.1.1.4 se puede observar el funcionamiento de la válvula en dos de sus posiciones de trabajo, mostrando la función del diámetro mayor del cilindro de hacer tope cuando está completamente cerrada o abierta. En la primera imagen la válvula está cerrada y en la segunda abierta.



**Figura 4.1.1.5.** Sección de la válvula en posición cerrada y abierta.

## 4.2 Fabricación de la válvula

Después de realizar el modelo en 3D de la válvula y obtener los planos, se procedió a la fabricación del prototipo en los laboratorios de la escuela. Para ello, previamente se realizaron las fichas de fabricación (Anexo D) donde se encontrarán detalladamente los procesos necesarios para el mecanizado de los componentes.

El material a utilizar es una barra de Nylon de Ø45mm para el manguito y la tapa, y otra barra de Nylon de Ø30mm para el cilindro. Las máquinas a utilizar y los parámetros de corte son los mismo que en el punto 2.2 "Fabricación del mecanismo".

### 4.2.1 Mecanizado

En éste apartado se explicarán los principales procesos de mecanizado de cada uno de los componentes que forman el conjunto válvula.

#### Cilindro:

El cilindro se mecanizó con una barra de Nylon de diámetro 30mm ya que el diámetro mayor de éste componente es de 29mm. En la una de las fases del mecanizado se cilindraron los diámetros de 15 mm (donde se conectará el ventilador mecánico) y de 25mm. Posteriormente se realizó el taladro de diámetro 11mm que será por donde fluirá el aire.

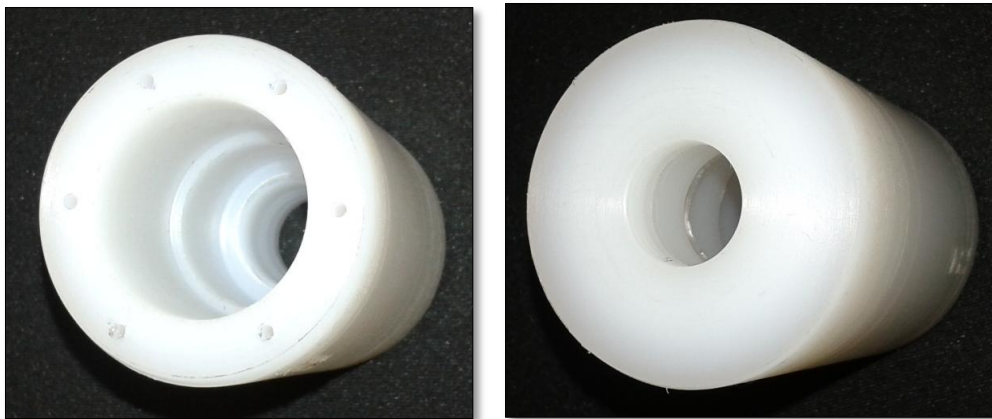
La siguiente fase consistió en cilindrar el diámetro de 29mm (donde se mecanizó la ranura), el diámetro de 25mm y los taladros. En la siguiente figura se muestran los detalles del mecanizado del cilindro.



*Figura 4.2.1.1. Mecanizado del cilindro.*

### **Manguito:**

Para el mecanizado de éste componente se utilizó una barra de Nylon de Ø45mm. El mecanizado se realizó en dos fases. Primeramente un lado donde se refrentó una de las caras y se mandrinó el diámetro central de 25.5mm y el diámetro mayor de 29mm (extremo por donde se introducirá el cilindro). Y a continuación el lado por donde se introducirá el pulmón (diámetro de 15mm). Finalmente se realizaron los taladros en una de las caras del manguito para realizar la fijación con la tapa y su posterior roscado M3. En la siguiente imagen se puede observar el mecanizado de los diámetros interiores.



*Figura 4.2.1.2.* Mecanizado de los diámetros interiores.

### **Tapa Manguito:**

Como se comentó en puntos anteriores, ésta pieza se añadió con el fin de evitar un mecanizado complejo en el manguito. También se utilizó una barra de diámetro 45mm ya que tapa y manguito tienen el mismo diámetro exterior (44mm). Mecanizar el diámetro interior de la válvula resultó más sencillo a diferencia que en el manguito, ya que es un diámetro pasante de 25mm. Para finalizar se taladraron los 6 agujeros para los tornillos M3.



*Figura 4.2.1.3.* Mecanizado de la tapa del manguito.

#### 4.2.2 Montaje

Una vez mecanizadas las piezas que forman la válvula se realizó el montaje, se comprobó el ajuste entre las piezas y se observó el correcto funcionamiento. En la siguiente imagen se muestran los componentes del prototipo que forman la válvula y el proceso de montaje.



*Figura 4.2.2.1.* Montaje del prototipo de la válvula lineal de aire.

A continuación se mostrarán tres posiciones de trabajo de la válvula, cerrada, abierta y una posición intermedia. En la siguiente figura se puede observar la válvula completamente cerrada. En la imagen de la derecha se puede apreciar al cilindro haciendo tope con el manguito, impidiendo el flujo de aire.



**Figura 4.2.2.2.** Válvula cerrada.

En la figura 4.2.2.3. se puede observar la válvula completamente abierta. En la imagen de la derecha se puede apreciar completamente el diámetro interior del manguito, por lo que el aire fluiría directamente a la salida de la válvula sin oponer ninguna resistencia.



**Figura 4.2.2.3.** Válvula abierta.

Finalmente, en la figura 4.2.2.3., se muestra una posición intermedia de la válvula. En la imagen de la derecha se puede apreciar parte del cilindro y parte del diámetro interior del manguito. Por lo que el flujo de aire tendría que recorrer la mitad del canal.



**Figura 4.2.2.4.** Válvula en una posición intermedia. [Fotografía]

El objetivo del tercer bloque consistía en diseñar la válvula, pero como se puede observar, se pudo ir más allá. Se fabricó un prototipo para poder observar su comportamiento mecánico y verificar los ajustes. De cara a proyectos futuros, queda pendiente la fase experimental, donde se calibrará la válvula para obtener las curvas de presión y caudal y ver su comportamiento.



## 5. Análisis del ciclo de vida

En el siguiente apartado se realizará el análisis de ciclo de vida del simulador pasivo de pulmón para determinar si es un producto sostenible. Para ello primeramente se analizarán los actores implicados, identificando que "intenciones" o "necesidades" tienen respecto al simulador; seguido de la identificación de los puntos calientes, donde se evaluarán los pros y contras del simulador teniendo en cuenta los tres capitales (Ambiental, Humano y Económico). Finalmente se valorarán las afectaciones positivas y negativas en los tres capitales para obtener una reflexión sobre el simulador.

### 5.1 Actores implicados

#### 5.1.1 Identificación de los actores implicados

Para realizar la identificación de los actores y sus necesidades, primeramente es necesario tener una clara idea sobre la cadena de producción del simulador, desde la extracción de los materiales hasta el final de su vida útil.



**Figura 5.1.1.1** Cadena de producción y fin de vida del simulador.

Con la idea de la cadena de producción de los simuladores se procedió a la evaluación de la cantidad de Campus Universitarios, Facultades de Medicina y Hospitales Universitarios de España, lugares donde se podría dar uso docente al simulador.



**Figura 5.1.1.2** Cantidad de consumidores potenciales en España.

### 5.1.2 Intereses de los actores implicados

En el apartado anterior se observó que existen varios actores implicados en la cadena de producción de los simuladores. Cada uno de ellos tendrá un interés particular, que se detallará en la siguiente tabla.

**Tabla 5.1.2.1:** Actores implicados y sus intereses.

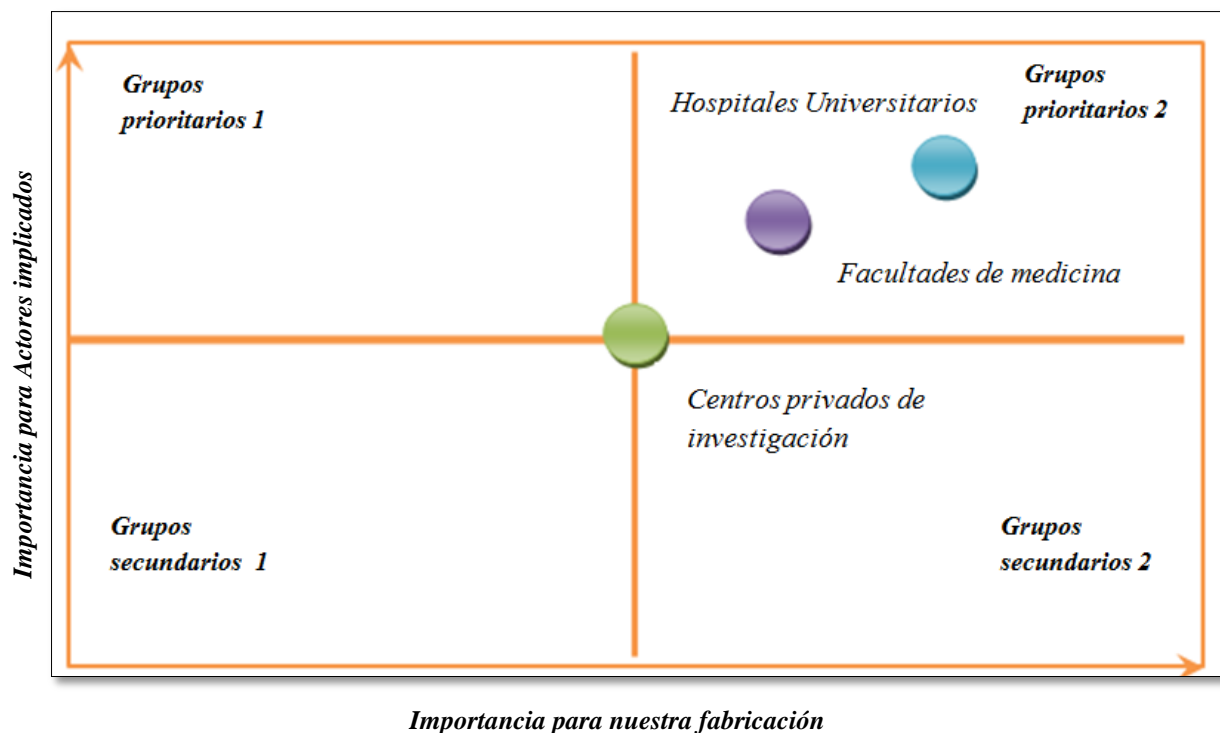
Actores implicados	Intereses
Campus Universitarios / Facultades de Medicina	Están interesados en mejorar la simulación del comportamiento de un pulmón conectado a un respirador mecánico. Necesitan automatizar la variación de la compliancia de un pulmón. <i>"... Uno de los principales problemas en el desarrollo de docencia sobre ventilación mecánica es la falta de modelos de pulmón sencillos, baratos y fácilmente reproducibles."</i> [6]
Hospitales Universitarios	Igual que las universidades, tienen la misma preocupación de facilitar la simulación del pulmón con instrumentos que sean sencillos de manipular para formar a los estudiantes.

**Centros de investigación  
(privados)**

A parte de investigar el comportamiento del pulmón o diferentes órganos del cuerpo humano, intentan experimentar sin el uso de animales.

*"... un proyecto que ha logrado simular a la perfección el funcionamiento del pulmón, corazón, hígado, riñón, intestino, páncreas, piel y médula ósea para evitar la explotación de los animales confinados a un laboratorio por la industria farmacéutica. La tecnología por fin pretende liberar a blancas ratas, a monos y perros beagles de la mano del genial **Donald Ingber**, fundador del Instituto Wyss de Harvard."* [7]

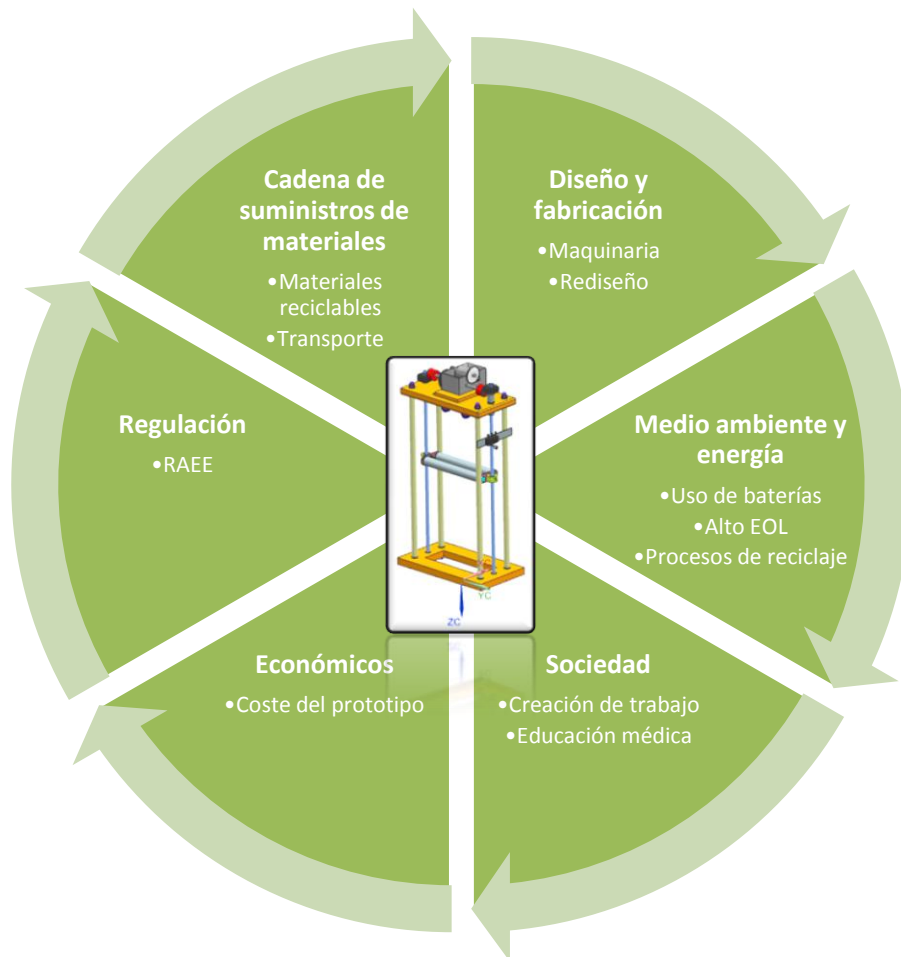
En el siguiente gráfico se relaciona la importancia que tienen los actores implicados en relación a la fabricación que se puede tener de nuestro producto, haciendo una pequeña estimación sabiendo los grupos prioritarios.



**Figura 5.1.2.1.** Gráfico de relevancia de actores implicados vs importancia fabricación del producto.

## 5.2 Puntos calientes

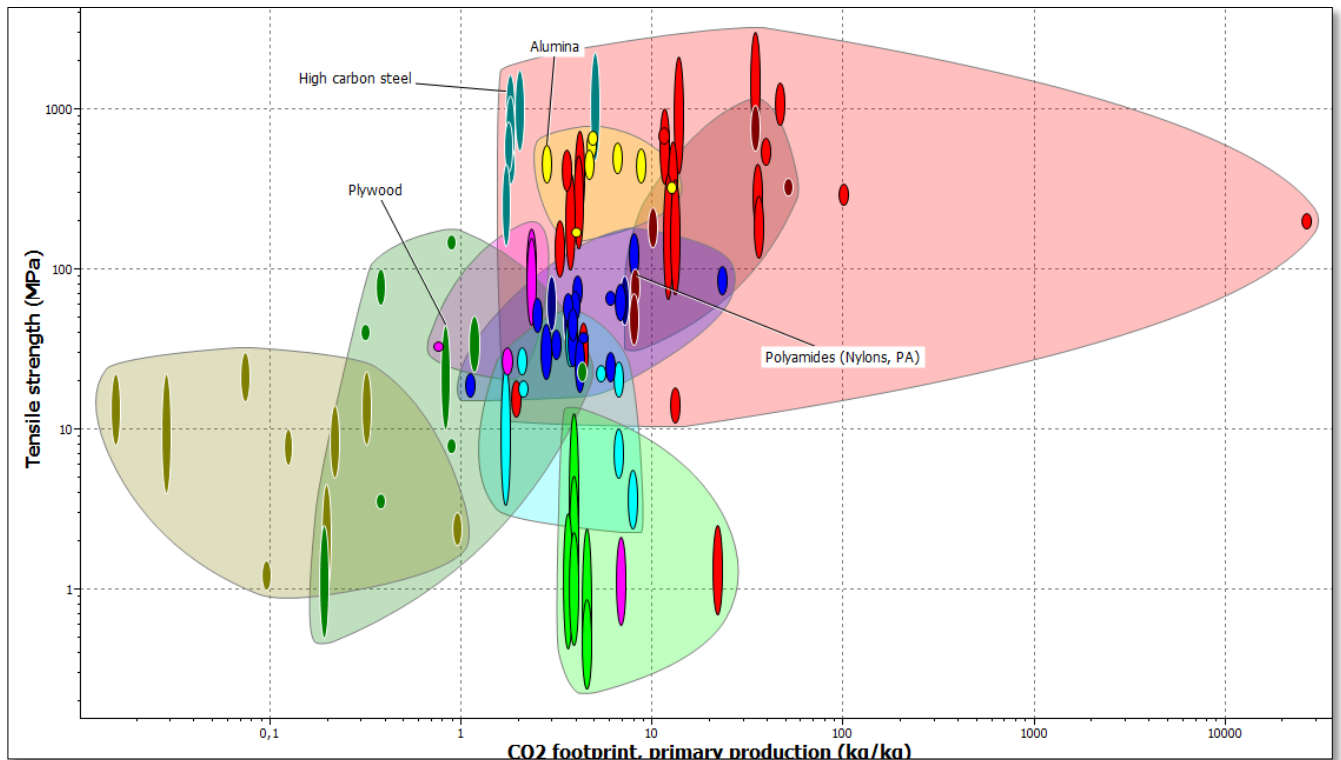
En este apartado se evaluará el simulador pasivo de pulmón para determinar el impacto que tiene en función del diseño, medio ambiente, sociedad, económicos, regulación y cadena de suministro.



**Figura 5.2.1.** Aspectos a analizar en el simulador pasivo de pulmón.

### 5.2.1 Diseño y fabricación

En apartados anteriores se explicó el criterio de selección de los materiales a utilizar para la fabricación del prototipo. Para seleccionarlos se tendría en cuenta la disponibilidad de material en la escuela o la obtención en ferreterías cercanas, y de fácil mecanizado. A continuación se analizarán los materiales utilizados para determinar su impacto ambiental en función de sus propiedades mecánicas.



*Figura 5.2.1.1.* Gráfico creado con CES Edupack.

Se puede observar que una pieza de Nylon que tiene una tensión de rotura de 100MPa genera una cantidad de 10kg de emisiones de CO<sub>2</sub> por cada kg producido.

### 5.2.2 Cadena de suministros

En éste apartado se analizará cada material en función de su producción y reciclaje.

#### Nylon:

Muchas piezas del simulador se han fabricado de este plástico también conocido como poliamida (PA). Son polímeros semicristalinos. Hay dos tipos: poliamidas estructurados a partir de un único material de partida (PA 6) y poliamidas estructurados a partir de dos materiales de partida (PA 66).

Los siguientes gráficos se muestran información sobre los países y la demanda de plásticos de productores:

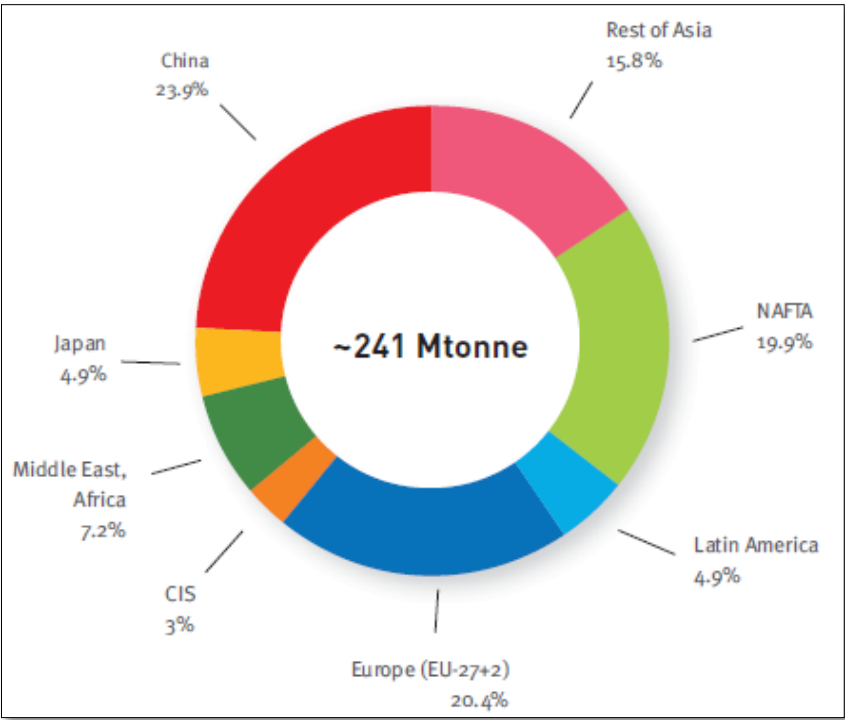
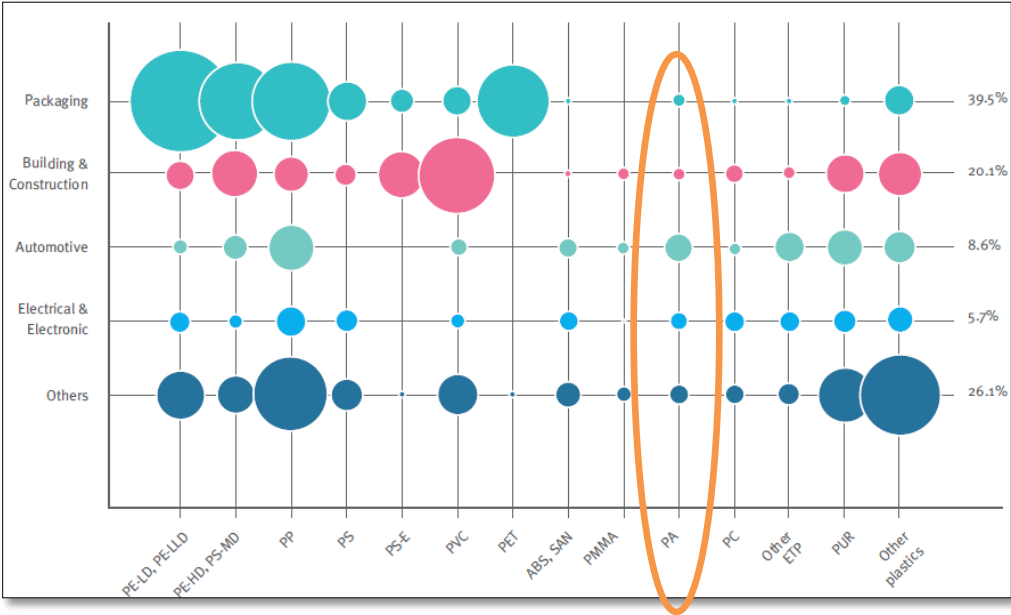


Figura 5.2.2.1 Producción mundial de plásticos en 2012.



Figure

5.2.2.2 Demanda europea de plásticos por sector y tipo de polímero 2014.

<b>Recycling and end of life</b>			
Recycle	✓		
Embodied energy, recycling	* 41,3	- 45,6	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 2,89	- 3,19	kg/kg
Recycle fraction in current supply	0,672	- 0,742	%
Downcycle	✓		
Combust for energy recovery	✓		
Heat of combustion (net)	* 30,1	- 31,7	MJ/kg
Combustion CO2	* 2,28	- 2,39	kg/kg
Landfill	✓		
Biodegrade	✗		

*Figura 5.2.2.3* Información sobre el reciclaje.

El nylon puede ser reciclado mecánica y químicamente. El proceso químico se basa en la despolimerización o gasificación. El reciclaje de los residuos de plástico tiene muchas ventajas mecánicas sobre el reciclado químico: la simplicidad del proceso, la relativamente baja inversión y la falta de productos químicos peligrosos en el proceso. Los beneficios de nylon reciclado es el hecho de que no se utiliza un aceite para su fabricación, requiere menos energía, el procesamiento emite menos CO<sub>2</sub> que la producción de nylon virgen, se reducen las emisiones por incineración y pueden reciclarse de nuevo al final de su vida útil.

### **Acero:**

Tornillos, tuercas, arandelas, estructura, varillas roscadas donde los rodillos se mueven, están hechas de este material. A continuación se muestra información sobre países productores de acero:

**Tabla 5.2.2.1** Producción de acero.

País	Toneladas métricas por año
<b>Australia</b>	5,30E+08
<b>Brasil</b>	3,89E+08
<b>Canadá</b>	4,00E+07
<b>China</b>	1,32E+09
<b>India</b>	1,50E+05
<b>Irán</b>	3,70E+04
<b>Kazakstán</b>	2,50E+07
<b>Rusia</b>	1,02E+08
<b>Sudáfrica</b>	6,70E+07
<b>Suecia</b>	2,60E+07
<b>Ucrania</b>	8,00E+07
<b>USA</b>	5,20E+07
<b>Venezuela</b>	3,00E+07
<b>Otros países</b>	8,80E+07

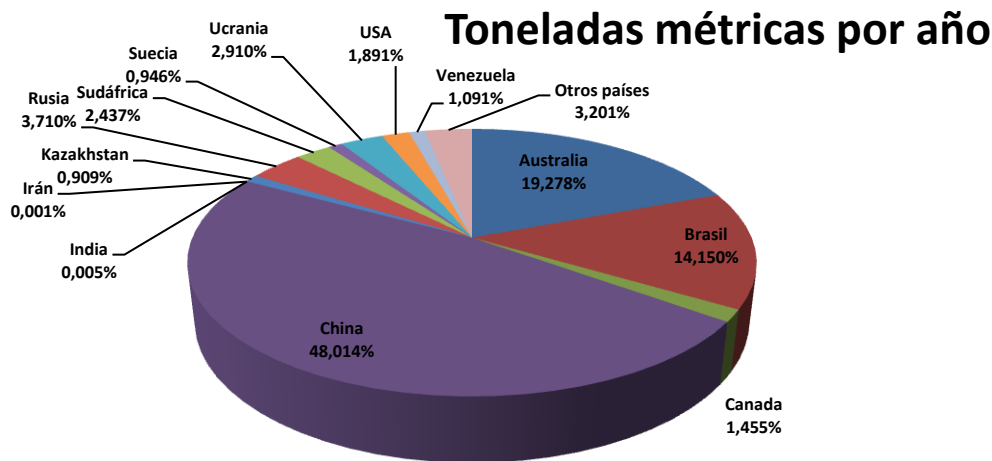


Figura 5.2.2.4. Productores de acero (%)

Recycling and end of life				
Recycle	✓			
Embodied energy, recycling	* 8,1	- 8,96		MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 0,636	- 0,703		kg/kg
Recycle fraction in current supply	39,9	- 44		%
Downcycle	✓			
Combust for energy recovery	✗			
Landfill	✓			
Biodegrade	✗			

Figura 5.2.2.5. Información del reciclaje del acero.

La chatarra generada se prensa formando grandes paquetes compactos. Estos paquetes son transportados a las industrias que reciclan el metal y se funden en hornos especiales, a continuación, se incorporan en el proceso de producción de acero. Se estima que actualmente se recicla más del 40% de acero en el mundo, producido en hornos eléctricos.

En el proceso de reciclaje es necesario respetar las normas de prevención de riesgos laborales y la naturaleza del medio ambiente. Siendo el consumo de electricidad muy alto, el funcionamiento del horno de fusión debe tratar de ser programados en las horas valle de consumo, siempre que sea posible. A la entrada de las plantas de reciclaje, los camiones que transportan las industrias de chatarra tienen que pasar por los arcos detectores de radioactividad.

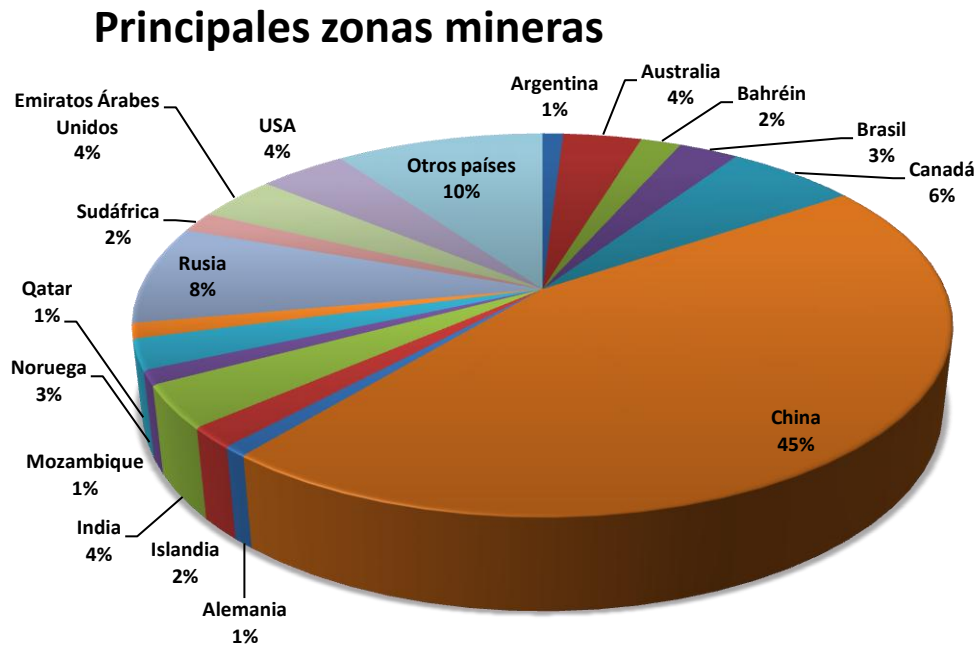


### **Aluminio:**

Finalmente, se hará hincapié en el uso de varillas de aluminio para reforzar la estructura y también para reforzar los rodillos que determinan la compliancia de los pulmones. En relación con la producción de aluminio, hay que diferenciar entre las empresas que extraen la materia prima (bauxita) y las empresas productoras de aluminio.

**Tabla.5.2.2.2** Producción de aluminio.

<b>País</b>	<b>Toneladas métricas por año</b>
<b>Argentina</b>	4,60E+05
<b>Australia</b>	1,75E+06
<b>Bahrén</b>	9,00E+05
<b>Brasil</b>	1,33E+06
<b>Canadá</b>	2,90E+06
<b>China</b>	2,15E+07
<b>Alemania</b>	4,00E+05
<b>Islandia</b>	8,25E+05
<b>India</b>	1,70E+06
<b>Mozambique</b>	5,60E+05
<b>Noruega</b>	1,20E+06
<b>Qatar</b>	6,00E+05
<b>Rusia</b>	3,95E+06
<b>Sudáfrica</b>	8,20E+05
<b>Emiratos Árabes Unidos</b>	1,80E+06
<b>USA</b>	1,95E+06
<b>Otros países</b>	4,65E+06



*Figura 5.2.2.6.* Productores aluminio (%).

Recycling and end of life				
Recycle	✓			
Embodied energy, recycling	* 32,3	-	35,7	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 2,54	-	2,8	kg/kg
Recycle fraction in current supply	40,5	-	44,7	%
Downcycle	✓			
Combust for energy recovery	✗			
Landfill	✓			
Biodegrade	✗			

*Figura 5.2.2.7.* Información sobre reciclaje del aluminio.

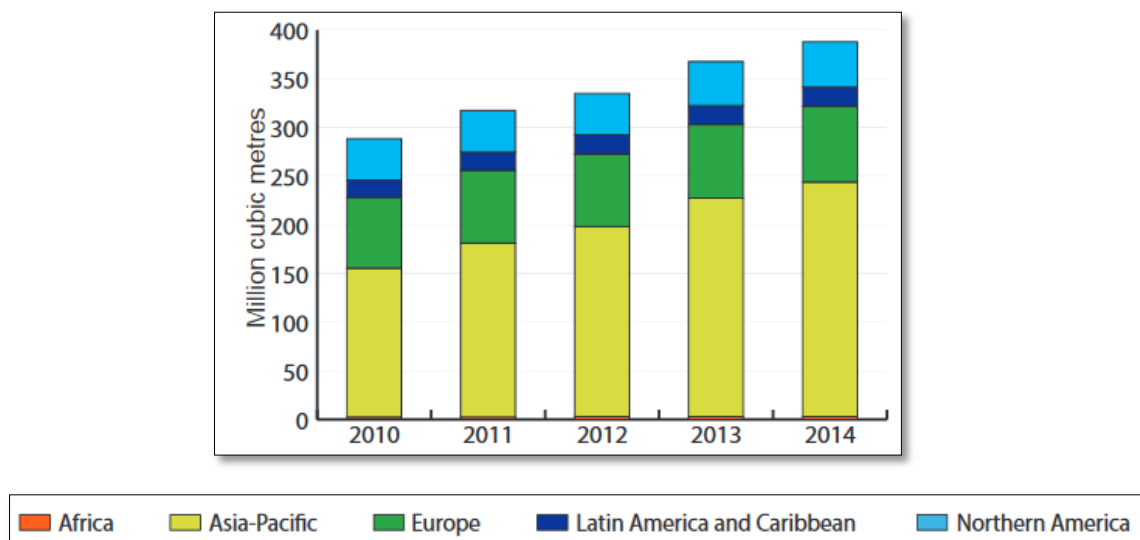
El proceso de reciclaje de aluminio comienza con la recogida de dicho material para la posterior transferencia a la planta de reciclaje, donde se separa, se limpia y se aplasta y se crean grandes bloques. El aluminio se funde, creando de nuevo esta láminas de material, listo para un nuevo uso.

El aluminio, después de hierro y acero es el metal más utilizado en el mundo, por lo que es muy importante educar a la gente a reciclar aluminio.

El aluminio tiene altos costos de extracción, especialmente la energía. El reciclaje de aluminio ahorra el 94% del coste de la energía. También es un material que no pierde propiedades después de varios procesos de reciclaje. Esto hace que prácticamente todo el aluminio utilizado en la industria, se recicla.

### **Madera:**

En cuarto lugar, otro material utilizado, en este caso para proporcionar una base para la estructura del mecanismo es la madera, que se utiliza en la base inferior y en la base del motor. En términos de producción, la región de Asia y el Pacífico, son las que producen el 62 por ciento de la producción mundial en 2014 (241 millones de metros cúbicos), seguido de Europa (78 millones de metros cúbicos, o 20 por ciento), América del Norte (46 millones de metros cúbicos, o un 12 por ciento ), América Latina y el Caribe (20 millones de metros cúbicos, o un 5 por ciento) y África (3 millones de metros cúbicos o 1 por ciento). La producción en la región de Asia y el Pacífico aumentaron un 7 por ciento en 2014, mientras que todas las demás regiones tuvieron sólo un aumento de 2.3 por ciento cada año.



*Figura 5.2.2.8.* Producción paneles de madera.

El reciclaje de la madera es el proceso mediante el cual la madera limpia de residuos, que no contiene contaminantes o materiales peligrosos tales como pegamento, pintura con plomo, asbesto o creosota, se desmenuza en astillas y utilizada para fabricar nuevos productos. Las ramas de los árboles, las viñas, las paletas y los descartes de madera limpia de las obras de construcción son todos ejemplos de residuos de madera limpia. El reciclaje reduce la tala de árboles nuevos, que conserva los bosques ya que son el hábitat de muchas aves y animales, y reduce la incidencia de la erosión del suelo. La madera reciclada se desvía de los vertederos y reduce el número de nuevos lugares para convertirlos en vertederos.

Recycling and end of life				
Recycle	×			
Recycle fraction in current supply	1,34	-	1,48	%
Downcycle	✓			
Combust for energy recovery	✓			
Heat of combustion (net)	* 19,8	-	21,3	MJ/kg
Combustion CO2	* 1,69	-	1,78	kg/kg
Landfill	✓			
Biodegrade	✓			

Figure 5.2.2.9. Información reciclaje de madera contrachapada.

Después de analizar cada material y ver si es reciclable o en qué país los produce, se pasa a analizar cuántas reservas de material quedan y cuál es su producción actual.

En el siguiente gráfico se ha hecho una comparación a nivel mundial de reservas de material en toneladas Vs producción en toneladas/año.

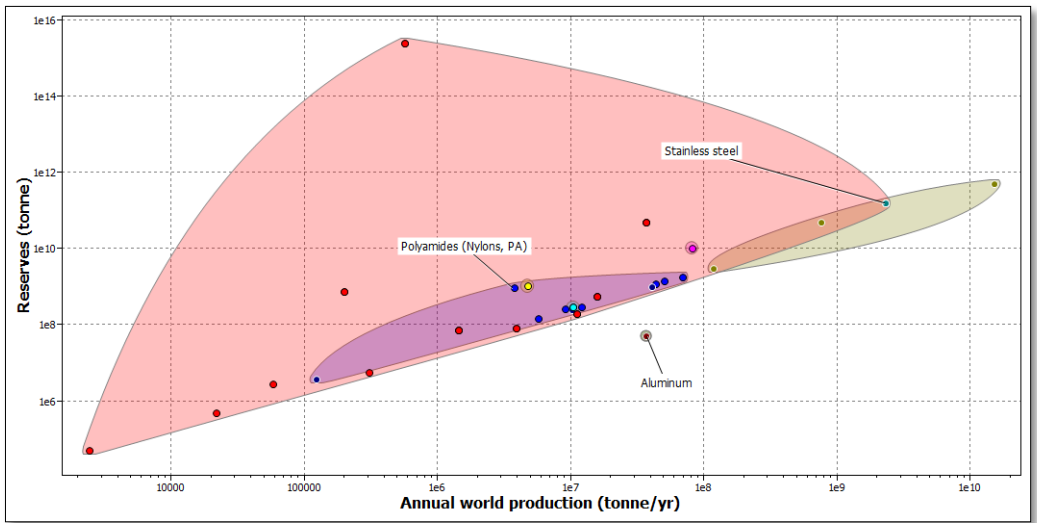


Figura 5.2.2.10. Reservas de materiales.

En este grafico se observa como el acero tiene una producción de  $2.3 \times 10^9$  toneladas/año, y unas reservas de acero de  $1.6 \times 10^{11}$  toneladas. En el caso del aluminio hay una producción de  $3.69 \times 10^7$  toneladas/año y unas reservas de  $4.99 \times 10^7$  toneladas. Para el nylon la producción es de  $3.75 \times 10^6$  toneladas/año y unas reservas de  $9.38 \times 10^8$  toneladas.

Una reflexión que se puede obtener a partir de estos resultados es que para el caso del nylon a este ritmo de producción se acabarían las reservas en 248 años aproximadamente. Para el acero, si se siguiera este ritmo de producción se podrían

acabar las reservas en 67 años. En último lugar para el aluminio con el ritmo de producción que hay hoy en día, se acabarían con las reservas en menos de dos años.

### 5.2.3 Medio ambiente y energía

Para obtener una reflexión sobre el medio ambiente y la energía que se consume en la fabricación del producto, se ha utilizado la herramienta ECOAUDIT de CES EduPack. Esta herramienta puede dar una idea acerca de la energía consumida (MJ) y la huella ecológica de CO<sub>2</sub> (kg) para producir el simulador. Cada uno tiene diferentes fases (materiales, fabricación, transporte, uso, eliminación y potenciales EOL). Además, incluye un análisis de costos.

#### Materiales, fabricación y final del ciclo de vida:

El simulador está compuesto por 26 componentes con materiales como la madera contrachapada, acero al carbono medio, aluminio y PA (nylon). Todos estos reciclados y fabricados en España.

Components											
Qty.	Component name	Material	Recycled content	Mass (kg)	Primary process	Length (m)	Secondary process	% removed	End of life	% recovered	
2	Base motor	Plywood (3 ply, beech), parallel to face layer	Virgin (0%)	0,13	Incl. in material value	Not Required	Cutting and trimming	1	Combust	100	
6	Varillas roscadas	Carbon steel, AISI 1030, normalized	Typical %	0,039	Extrusion, foil rolling	0,285	Coarse machining	1	Recycle	100	
6	Tubos estructura	Aluminum, 5005, wrought, H14	Typical %	0,015	Extrusion, foil rolling	0,285	Coarse machining	1	Recycle	100	
6	Casquillo	PA6 (cast)	Virgin (0%)	0,000348	Polymer extrusion	0,001	Cutting and trimming	1	Recycle	100	
4	Casquillo rodillo	PA6 (cast)	Virgin (0%)	0,00011	Polymer extrusion	0,001	Cutting and trimming	1	Recycle	100	
2	Acople	PA6 (cast)	Virgin (0%)	0,001291	Polymer extrusion	0,003	Fine machining	1	Recycle	100	
22	Tuercas	Carbon steel, AISI 1030, normalized	Typical %	0,0016	Forging	Not Required	Coarse machining	1	Recycle	100	
12	Tornillos	Carbon steel, AISI 1030, normalized	Typical %	0,0021	Forging	Not Required	Coarse machining	1	Recycle	100	
22	Arandelas	Carbon steel, AISI 1030, normalized	Typical %	0,000308	Forging	Not Required	Coarse machining	1	Recycle	100	
10	Chapas rodillos	Carbon steel, AISI 1030, normalized	Typical %	0,0025	Forging	Not Required	Cutting and trimming	1	Recycle	100	
2	Tuerca deslizable	Carbon steel, AISI 1030, normalized	Typical %	0,0015	Forging	Not Required	Coarse machining	1	Recycle	100	
2	Pasador escuadra	PA6 (cast)	Virgin (0%)	0,0018	Polymer extrusion	0,003	Fine machining	1	Recycle	100	
2	Tapa pasador escuadra	PA6 (cast)	Virgin (0%)	0,000467	Polymer extrusion	0,001	Cutting and trimming	1	Recycle	100	
2	Varilla tornillo	Carbon steel, AISI 1030, normalized	Typical %	0,002164	Extrusion, foil rolling	0,004	Cutting and trimming	1	Recycle	100	
2	Tornillo sinfin	PA6 (cast)	Virgin (0%)	0,002173	Polymer extrusion	0,004	Cutting and trimming	1	Recycle	100	
4	Acople rodillo	PA6 (cast)	Virgin (0%)	0,0022	Polymer extrusion	0,002	Cutting and trimming	1	Recycle	100	
2	Rueda dentada	PA6 (cast)	Virgin (0%)	0,002068	Polymer extrusion	0,001	Cutting and trimming	1	Recycle	100	

**Figura 5.2.3.1** Componentes (materiales, fabricación y final de ciclo de vida).

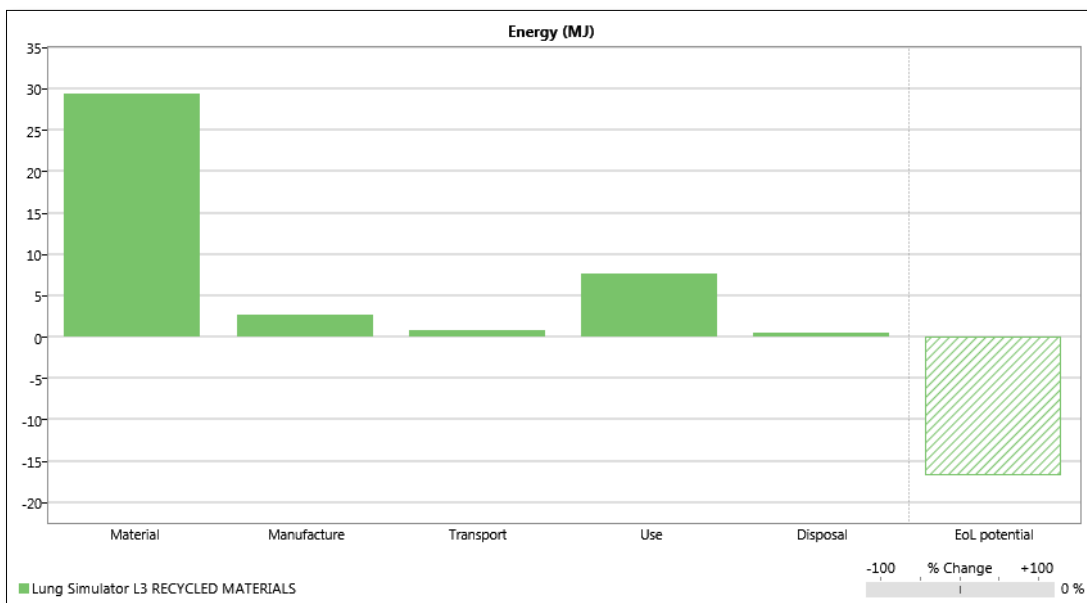
#### Transporte:

En el análisis de los actores implicados se determinó que el grupo que tiene más interés sobre el producto son los Hospitales Universitarios (alrededor de 39 en España). Por lo que la cantidad de simuladores tal vez no puede exceder aproximadamente de cientos. El transporte de los simuladores se llevará a cabo por los vehículos de carga ligera y no será de más de 800 kilómetros, ya que se parte de la hipótesis que será dentro del territorio español.

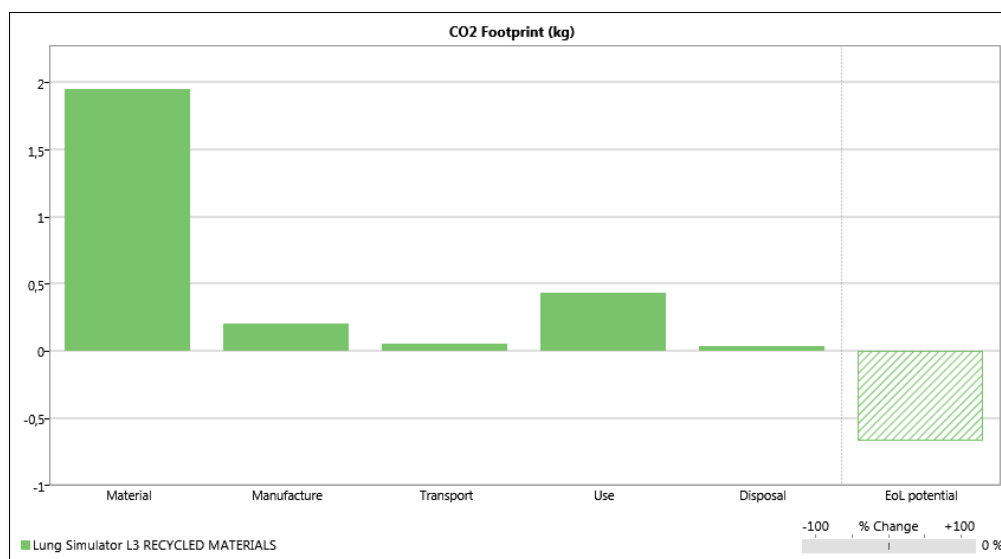
### **Uso:**

Para el uso, se ha supuesto 6 años el tiempo de vida del producto, utilizando el promedio de 180 días al año. Se utilizará dentro de España y será de uso comercial. Además, este mecanismo tiene un pequeño motor eléctrico por lo que necesita una batería de 3 voltios.

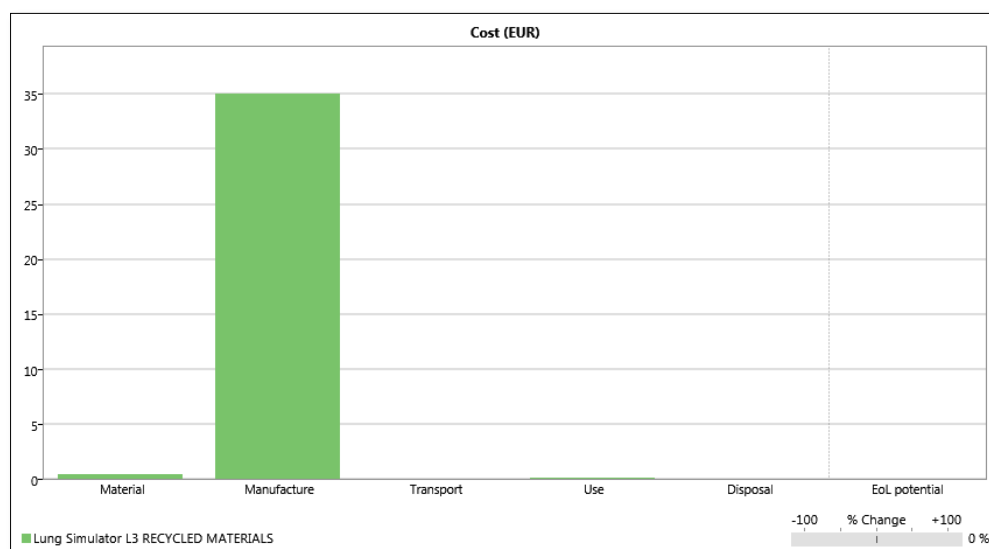
Después de introducir los datos sobre los materiales, el transporte y uso, se han podido obtener los siguientes resultados:



**Figura 5.2.3.2.** Energía necesitada para producir el simulador.



**Figura 5.2.3.3.** Emisiones de CO<sub>2</sub> para producir el simulador.



**Figura 5.2.3.4** Análisis del coste.

Se puede observar que los materiales tienen el mayor impacto sobre el medio ambiente (alrededor de 30 MJ de energía y 2 kg de CO<sub>2</sub>) a pesar de que se están utilizando materiales reciclados.

El uso, la fabricación y el transporte tienen poco impacto porque necesita poca energía (una batería de 3 voltios para el motor), la cantidad de simuladores son pequeñas, y se va a fabricar y entregar el producto por toda España. En el análisis de costos, se puede ver que la fabricación es la fase más costosa del simulador (35 €).

Por lo tanto se puede reflexionar acerca de la necesidad de trabajar estas dos fases para mejorar el producto y hacerlo más sostenible. Para los materiales se deberían realizar las siguientes acciones:

- Seleccionar el material con la menor huella energética y de CO<sub>2</sub> por unidad de función.
- Utilizar un gran "contenido reciclado" en el material como sea posible.
- Utilizar la menor cantidad de material posible.

Además, para reducir el coste de fabricación se debería efectuar las siguientes acciones:

- Fabricar el producto en un lugar con una mano de obra barata.
- Seleccionar un proceso más rápido. El tiempo, casi siempre, es el dinero.
- Tratar de extender la vida de las herramientas - el tiempo de inactividad para los cambios de herramienta es improductivo.
- Analizar y minimizar la tasa de rechazo de piezas procesadas.

#### **5.2.4 Regulación, legislación**

Este producto está compuesto por una estructura con un motor eléctrico que mueve un mecanismo. Por lo que la regulación y la legislación relativa a este tipo de productos son los siguientes:

- La Directiva 2012/19 / UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).
- Real Decreto 110/2015, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

La presente Directiva establece medidas para proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención o la reducción de los impactos adversos de la generación y gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y la reducción de los impactos globales del uso de los recursos y mejorar la eficiencia de dicho uso. La directiva se aplica a los equipos pequeños (sin dimensión exterior superior a 50 cm). También se aplican a los productos sanitarios.

Por lo que el simulador debe fomentar la cooperación entre los productores y los recicladores y medidas para promover el diseño y la producción de AEE, especialmente



con el fin de facilitar la reutilización, el desarmado y la valorización de los RAEE, sus componentes y materiales.

### **5.2.5 Económicos**

Como se pudo observar en la gráfica anterior del coste del simulador, los materiales no suponen un incremento en el precio del producto, pero si el proceso de fabricación. A continuación se mostrarán los costes de producción de los cuatro materiales utilizados en la fabricación del simulador.

- Un kg de Nylon tiene un costo de producción que está entre 3,03-3,36 euros / kg.
- En el caso de la madera el coste de producción es de entre 0,412 hasta 0,457 euros /kg.
- Para el acero, el costo de producción es entre 0.393 - 0.433 euros /kg.
- Por último, el aluminio, donde su costo de producción es de entre 1,58 - 1.74 euros /kg.

### **5.2.6 Sociedad**

El simulador pasivo de pulmón tiene beneficios sociales para los estudiantes de enfermería, que podrán acceder a un simulador barato con el que poder mejorar su nivel en ventilación mecánica, ya que con el grado de automatización obtenido, se han mejorado las prestaciones del pulmón. Otro grupo importante de beneficiados son los pacientes que podrán obtener mejores atenciones gracias al grado de especialización de los propios estudiantes. Por último también se crearán puestos de trabajo y así se contribuirá al movimiento de la economía.

### 5.3 Integración en los tres capitales: Ambiental, Económico y Humano

**Tabla 5.3.1.** Matriz de la integración en los tres capitales.

	<i>Capital Natural</i>	<i>Capital Humano</i>	<i>Capital de Fabricación ()costes</i>
<i>Diseño y fabricación</i>			<i>Rediseño del mecanismo (-)</i> <i>Maquinaria utilizada es tradicional (+ -)</i>
<i>Cadena de suministros de material</i>	<i>El uso de materiales reciclados requiere poca energía (+++).</i> <i>Aluminio es uno de los materiales más reciclados (+++).</i> <i>El uso de madera reciclada preserva los bosques (+++).</i>	<i>Derechos sociales de los trabajadores (++).</i>	<i>Materiales baratos (++)</i> <i>Transporte(++)</i>
<i>Medio ambiente y energía</i>	<i>Alto potencial EOL (+++).</i> <i>Materiales con alto impacto en el medio ambiente (- -).</i> <i>Fabricación y transporte tienen bajo impacto (++).</i> <i>Alto coste de fabricación (- -).</i>		<i>Utiliza baterías para el funcionamiento (-)</i> <i>Procesos de reciclaje (+)</i>
<i>Regulación</i>	<i>Directiva RAEE protege el medio ambiente y la salud de las personas (+++).</i>	<i>Normas de seguridad para su uso (++).</i>	
<i>Económicos</i>			<i>Prototipo vs. producción a escala mayor (-)</i>
<i>Sociedad</i>		<i>Ayuda para la enseñanza. (++).</i> <i>Empleo (++).</i>	

## **Capital Humano**

### **Cadena de suministro de material**

Los cuatro materiales, tanto la materia prima y su posterior fabricación/producción, están realizados en su totalidad en la Unión Europea, excluyendo otros países que no tienen una normativa y legislación donde prevalecen los derechos humanos.

### **Regulación**

Además de cumplir con los reglamentos expuestos en el apartado "5.2.4 Regulación y legislación", el mecanismo se ajusta a los siete principios del diseño universal, que se interpreta como el esfuerzo de diseñar productos de modo que sean accesibles para el mayor número posible de usuarios, ya que el simulador es sencillo, intuitivo y tiene un uso flexible.

### **Sociedad**

Los principales beneficiarios son los alumnos, pero otro grupo que se beneficiará del simulador son los pacientes, ya que los estudiantes podrán practicar con el mecanismo y adquirir un mejor conocimiento en la ventilación asistida y ser mucho más efectivos con los pacientes. Además, industrializar un producto, como será el caso del simulador, creará puestos de trabajo.

## **Capital Natural**

### **Cadena de suministro de material**

El producto tiene cuatro materiales principales (nylon, acero, aluminio y madera), todos ellos son reciclables. Los beneficios de nylon reciclado es el hecho de que no se utiliza aceite para su fabricación y requiere menos energía. En el caso de aluminio, después del hierro y el acero es el metal más utilizado en el mundo, y es también uno de los materiales más reciclables. Y por último, el reciclaje de maderas reduce la tala de árboles nuevos, que conserva los bosques que son el hábitat de muchas aves y animales, y reduce la incidencia de la erosión del suelo.

### Medio ambiente y energía:

Usando la herramienta ECOAUDIT se pudo ver que los materiales tienen el mayor impacto sobre el medio ambiente (alrededor de 30 MJ de energía y 2 kg de CO<sub>2</sub>) a pesar de que se están utilizando materiales reciclados. El uso, la fabricación y el transporte tienen un poco de impacto porque necesita poca energía (una batería de 3 voltios), la cantidad de simuladores son pequeñas, y además se va a fabricar y entregar el producto por toda España. En el análisis de costes, se observó que la fabricación es la fase más costosa del simulador (35€).

### Regulación:

La Directiva sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) da medidas para proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención o la reducción de los impactos adversos de la generación y gestión de los RAEE y mediante la reducción de los impactos globales del uso de los recursos y mejorar la eficiencia de dicho uso.

### **Capital de fabricación**

#### Diseño y fabricación

En el diseño del mecanismo que automatiza el simulador, inicialmente se escogió un motor y una relación de engranes que no era la correcta. Por este motivo se tuvo que cambiar el motor y la relación de engranes con diferentes ruedas dentadas. Esto supuso un gasto adicional.

Respecto a la maquinaria utilizada, se puede decir que aunque sean máquinas-herramientas caras, no son máquinas especiales ni las más caras del mercado industrial.

#### Cadena de suministros de material

En la fabricación del mecanismo se utilizan materiales comunes como: acero, aluminio, nylon (PA) y madera contrachapada, ya que son económicos. Por otro lado el transporte de estas materias primas no es excesivamente caro, ya que se han adquirido en la comunidad europea, fomentando el comercio. Estos materiales, pese a ser más baratos en el mercado asiático, implicaría mayor gasto en el transporte..

### Medio ambiente y energía

Para el funcionamiento del mecanismo se necesitan pilas para el motor y la electrónica introducida en el mecanismo (final de carrera, arduino). Como la estructura y el simulador son componentes de larga duración implica que serán necesarias varias pilas en el ciclo de vida del producto.

Todos los materiales utilizados tienen procesos de reutilización y reciclaje lo que puede implicar un ingreso al venderlo a empresas de reciclaje.

### Económicos

El coste de la fabricación de un prototipo es más caro ya que hay que comprar mucho material que no se utilizará. Una posible producción a mayor escala sería más rentable, ya que como se ha observado en el apartado "5.1 Actores implicados" el simulador tiene varios consumidores potenciales.

## 6. Presupuesto

Este capítulo tiene como finalidad mostrar el coste que ha supuesto la realización de éste proyecto, seguido de un análisis de la inversión.

### 6.1 Costes del proyecto

#### Materiales y componentes eléctricos

En la siguiente tabla se muestran los materiales necesarios. Cabe destacar que están incluidos los precios de los materiales obtenidos en la escuela (madera y chapa de acero), además de los dos motores (motor del diseño y del rediseño).

**Tabla 6.1** Materiales y componentes eléctricos.

Ítem	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio	Unidad	Total (€)
1	Varilla roscada de acero cincado M5	2	m	0,89	€/m	1,78
2	Perfil tubo redondo Al (bruto Ø 8mm x 1mm espesor)	1	m	1,35	€/m	1,35
3	Perfil tubo redondo Al (bruto Ø 13mm x 1mm espesor)	1	m	2,95	€/m	2,95
4	Tuerca ciega hexagonal acero cincado M5	10	unidades	0,08	€	0,85
5	Arandela plana DIN125 M5	16	unidades	0,01	€	0,23
6	Tuerca hexagonal acero cincado DIN934 M5	10	unidades	0,02	€	0,17
7	Tornillo hexagonal DIN 933 M5 X 12 FORMA C	12	unidades	0,06	€	0,68
8	Tornillo hexagonal DIN 933 M5 X 6	6	unidades	0,06	€	0,34
9	Tornillo avellanado Ø 2,5 x 8mm	6	unidades	0,05	€	0,32
10	Barra Nylon (bruto Ø 8mm x 1mm espesor)	1	m	1,00	€/m	1,00
11	Barra Nylon (bruto Ø 15mm x 1mm espesor)	1	m	3,32	€/m	3,32
12	Chapa acero 0,8mm espesor	1	unidad	2,40	€	2,40
13	Tablero madera contrachapada 10mm espesor	1	unidad	1,65	€	1,65
14	Motor eléctrico (REDUCTORA 17:1)	1	unidad	9,75	€	9,75
15	Motor eléctrico (REDUCTORA 23:1)	1	unidad	8,46	€	8,46
16	Surtido engranajes M1	1	unidad	10,45	€	10,45
17	Arduino	1	unidad	7,83	€	7,83
18	Microinterruptor DB1C.B1LC	1	unidad	1,65	€	1,65
19	Driver motor SHD-MSTEPPER	1	unidad	9,62	€	9,62
						64,79

### **Horas de ingeniería**

El proyecto ha sido realizado por dos ingenieros mecánicos con un total de:

✓ 208 horas de trabajo.

Teniendo en cuenta el precio hora de un ingeniero (30€/hora), el coste de las horas de ingeniería sería de:

✓ 6240 €.

### **Horas de taller**

Para llevar a cabo la fabricación de los prototipos ha sido necesario el trabajo en los laboratorios de la escuela. Las horas de dedicación en el taller son un total de:

✓ 33 horas de trabajo.

Teniendo en cuenta el precio hora de un técnico superior (15€/hora), el coste de las horas de taller sería de:

✓ 495 €.

### **Presupuesto total**

Teniendo en cuenta las horas de ingeniería, taller y materiales, el coste total del proyecto asciende a:

✓ **6799.79 €**

## 6.2 Análisis de la inversión

Una vez obtenido el coste total del proyecto se realizará un análisis de la inversión de acorde al valor actual neto (VAN) y la tasa interna de rentabilidad (TIR), y de esta manera determinar si es un proyecto rentable.

Para ello primeramente se plantearán las hipótesis que influirán en el análisis de la inversión. Cabe destacar que en España hay 186 centros donde posiblemente se dará uso al simulador pasivo de pulmón (entre facultades de medicina y hospitales universitarios), y el objetivo es que en un plazo de dos años cada centro disponga de como mínimo un simulador. El precio de partida será de 30 €. A continuación se detallan los valores a tener en cuenta para el análisis de la inversión:

1. Coste de la inversión inicial: 6799.79 € (teniendo en cuenta las horas de ingeniería, horas de taller y materiales utilizados).
2. Flujo de caja anual: 4500 € el primer año (vendiendo 150 simuladores) y 7500 € el segundo año (vendiendo 250 simuladores). Con esta producción anual, en dos años se garantizaría que en cada centro docente haya más de un simulador.
3. Tipo de interés anual: 8.05 %

### **Cálculo del valor actual neto (VAN):**

$$VAN = -A + \frac{[FC1]}{(1+r)^1} + \frac{[FC2]}{(1+r)^2} + \dots + \frac{[FCn]}{(1+r)^n} \quad (6.2.1)$$

Donde "A" es la inversión inicial, "FC" los flujos de caja, "n" el número de años y "r" el tipo de interés.

Obteniendo que el valor actual neto sería de 3789.04 €.

### **Cálculo de la tasa interna de rentabilidad (TIR):**

La tasa interna de rentabilidad son los tipos de descuento que hacen que el valor actual neto sea igual a cero. Por lo tanto para el cálculo se aplica la siguiente expresión:

$$VAN = -A + \frac{[FC1]}{(1+r)^1} + \frac{[FC2]}{(1+r)^2} + \dots + \frac{[FCn]}{(1+r)^n} = 0 \quad (6.2.2)$$



Donde "A" es la inversión inicial, "FC" los flujos de caja, "n" el número de años y "r" el tipo de interés.

Despejando el tipo de interés (r), se ha obteniendo que la tasa interna de rentabilidad es del 43.2 %.

### **Análisis de los resultados:**

Dado que el valor actual neto (VAN) es positivo, implica que la realización del proyecto permitirá recuperar el capital invertido.

Además, ya que la tasa interna de rentabilidad (TIR) es mayor que el tipo de interés anual establecido (8%), se puede concluir que es un proyecto de inversión aceptable.

### **Estudio de sensibilidad:**

Con el análisis del VAN y TIR se pudo concluir que era un proyecto de inversión aceptable. Pero se planteó la posibilidad de observar que pasaría si el interés anual variaba. Para ello se realizó un estudio de sensibilidad donde se aumentó al 9.05 % el tipo de interés anual.

Obteniendo (a partir de la fórmula 6.2.1) que el VAN resultante sería de 3633.57 € y el proyecto seguiría siendo rentable.

## **7. Conclusiones**

### **Primer bloque:**

En el primer bloque se realizó un primer prototipo, pero después de su evaluación, se observó que no funcionaba correctamente. Es por esto que se rediseñaron y se cambiaron algunos de sus componentes, obteniendo mejores resultados que el primero.

Se logró crear un mecanismo sencillo, capaz de variar automáticamente la compliancia pulmonar. Cabe destacar que se creó de cero, y no existen máquinas similares en el mercado.

### **Segundo bloque:**

En el segundo bloque el objetivo era automatizar diferentes posiciones de compliancias del pulmón. Se realizó una propuesta donde se instalaría un final de carrera para limitar el recorrido de los rodillos a través de las varillas roscadas. Para controlar esas posiciones se utilizaría Arduino, programando una serie de condiciones que permitirían a los rodillos posicionarse en diferentes volúmenes. Estas condiciones temporales se calcularían sabiendo la velocidad que transmite el motor a las varillas a través de las ruedas dentadas, y con el avance de los rodillos estimar la posición y por lo tanto el volumen que determinarían los rodillos.

### **Tercer bloque:**

La misión de éste bloque era el diseño de una válvula lineal de caudal de aire. Pero finalmente se pudo ir más allá, llegando a la fabricación de un prototipo. Se pudo observar que el funcionamiento de la válvula es correcto. Como proyecto futuro, queda pendiente la fase de experimentación, donde se deberá calibrar la válvula para poder evaluarla.

### **Análisis del ciclo de vida:**

Una vez realizado el análisis del ciclo de vida, se comprobó que es un producto sostenible ya que tiene más aspectos positivos que negativos en la matriz de integración en los tres capitales (natural, humano, y económico).

## **8. Agradecimientos**

Queremos agradecer principalmente a nuestro tutor, el Dr. Ing. Industrial Hernán A. González, por ayudarnos a sacar adelante el proyecto. No dudó en compartir sus conocimientos y dedicarnos horas y horas a resolver los problemas que iban surgiendo. Además de motivarnos y exigirnos el máximo nivel en éste proyecto.

También al Sr. Técnico de Mantenimiento de la escuela Herminio Santiago López, por ayudarnos en el taller, aportando su experiencia para mejorar los procesos y técnicas de fabricación.

Finalmente, y no por eso menos importante, a nuestras familias, que han estado a nuestro lado a lo largo de esta larga etapa, apoyándonos y dándonos ánimos a continuar luchando por aquello que soñábamos, llegar a ser INGENIEROS.

## 9. Bibliografía

### Referencias

- [1] Dueñas, C., Ortiz, G. and González, M. (2009). *Ventilación mecánica*. Bogotá: Distribuna.
- [2] Anon, (2016). [online] Available at:  
[http://iessaenzburuaga.juntaextremadura.net/carrotools/421\\_hoja.html](http://iessaenzburuaga.juntaextremadura.net/carrotools/421_hoja.html) [Accessed 26 Jun. 2016].
- [3] Arduino.cl. (2016). *¿Qué es Arduino? ~ Arduino.cl*. [online] Available at:  
<http://arduino.cl/que-es-arduino/> [Accessed 26 Jun. 2016].
- [4] Anon, (2016). [online] Available at:  
[http://www.electronicoscaldas.com/datasheet/L293D-L293DD\\_ST.pdf](http://www.electronicoscaldas.com/datasheet/L293D-L293DD_ST.pdf) [Accessed 26 Jun. 2016].
- [5] Verbraak, A., Holland, W., Mulder, B., Bogaard, J. and Versprille, A. (1999). Computer-controlled flow resistance. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 37(6), pp.770-775.
- [6] Medina Villanueva, A., Rey Galán, C., Concha Torre, A., Menéndez Cuervo, S., Los Arcos Solas, M., & Mayordomo Colunga, J. (2010). Simulador de pulmón. *Anales De Pediatría*, 73(4), 202-206. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anpedi.2010.05.016>
- [7] VeoVerde. (2016). *veoverde*. Retrieved 23 March 2016, from  
<https://www.veoverde.com/2013/03/simulador-de-organos-evitara-investigacion-con-animales-en-5-anos/>

### Consultas

- Gómez, J. (2008). *Tecnología de fabricación*.
- L293D, M. (2016). *Shield de motores con L293D (L293D Motor shield)*. [online] Electronicos Caldas. Available at: <http://www.electronicoscaldas.com/shields-escudos-arduino/511-shield-de-motores-para-arduino-shd-mstepper.html> [Accessed 26 Jun. 2016].

- Elecfreaks.com. (2016). *ElecFreaks - Wiki*. [online] Available at: [http://www.elecfreaks.com/wiki/index.php?title=Arduino\\_Motor/Stepper/Servo\\_Shield](http://www.elecfreaks.com/wiki/index.php?title=Arduino_Motor/Stepper/Servo_Shield) [Accessed 26 Jun. 2016].
- *Hospitales docentes*. (2016). *Fesemi.org*. Retrieved 28 March 2016, from <https://www.fesemi.org/formacion/residentes/hospitales>
- *Notas de corte: Medicina 2015 / NotasDeCorte.es*. (2016). *Notasdecorte.es*. Retrieved 28 March 2016, from <http://notasdecorte.es/medicina>
- *West Care Medical Ltd - home.php*. (2016). *West Care Medical Ltd - home.php*. Retrieved 28 March 2016, from <http://wwwnew.westcaremedical.com/Pages/home.php>
- Plasticseurope.es. (2016). *PlasticsEurope - PlasticsEurope - PlasticsEurope*. [online] Available at: <http://www.plasticseurope.es/industria-del-plastico/plasticseurope.aspx> [Accessed 26 Apr. 2016].
- Plasticseurope.es. (2016). [online] Available at: <http://www.plasticseurope.es/Document/plastics---the-facts> 2015.aspx?Page=DOCUMENT&FolID=2 [Accessed 26 Apr. 2016].
- Anon, (2016). [online] Available at: <https://www.worldsteel.org/> [Accessed 26 Apr. 2016].
- Medina Villanueva, A., Rey Galán, C., Concha Torre, A., Menéndez Cuervo, S., Los Arcos Solas, M. and Mayordomo Colunga, J. (2010). Simulador de pulmón. *Anales de Pediatría*, 73(4), pp.202-206.
- Bcgroupintl.com. (2016). *Welcome to BC Group International*. [online] Available at: [http://www.bcgroupintl.com/BC\\_Biomedical\\_Manuals/](http://www.bcgroupintl.com/BC_Biomedical_Manuals/) [Accessed 26 Jun. 2016].
- Drive4marketing.com. (2016). *Información de la industria – IMEDAL*. [online] Available at: <http://www.drive4marketing.com/clientes/imedal/servicios/informacion-de-la-industria/> [Accessed 26 Apr. 2016].
- Fao.org. (2016). *Estadísticas de productos forestales*. [online] Available at: <http://www.fao.org/forestry/statistics/80938@180724/es/> [Accessed 26 Apr. 2016].

- Enfermeriarespira.es. (2016). Ventilación Mecánica: Mecánica pulmonar. [online] Available at: <http://www.enfermeriarespira.es/about/mecanica-pulmonar>. [Accessed 5 May 2016].
- Inforeciclaje.com. (2016). Inforeciclaje. El portal con información sobre el reciclaje.. [online] Available at: <http://www.inforeciclaje.com/reciclaje-aluminio.php> [Accessed 5 May 2016].
- Eur-lex.europa.eu. (2016). *EUR-Lex - 32012L0019 - EN - EUR-Lex*. [online] Available at: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1461444302324&uri=CELEX:32012L0019> [Accessed 5 May 2016].
- Boe.es. (2016). *BOE.es - Documento BOE-A-2015-1762*. [online] Available at: [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2015-1762](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2015-1762) [Accessed 5 May 2016].
- Tratado.uninet.edu. (2016). *2.1.7. Mecánica respiratoria*. [online] Available at: <http://tratado.uninet.edu/c020107.html> [Accessed 26 Jun. 2016].
- Mwmaterialsworld.com. (2016). *Barra redonda de Nylon*. [online] Available at: <http://www.mwmaterialsworld.com/es/barra-redonda-de-nylon.html> [Accessed 26 Jun. 2016].
- Directindustry.es. (2016). *Barra redonda / de plástico de alto rendimiento - 01.2115.0006 - APSOparts® - Vídeos*. [online] Available at: [http://www.directindustry.es/prod/apsoparts-r/product-5082-431537.html#product-item\\_1461087](http://www.directindustry.es/prod/apsoparts-r/product-5082-431537.html#product-item_1461087) (info) [Accessed 26 Jun. 2016].
- Anon, (2016). [online] Available at: <http://www.mwmaterialsworld.com/es/metal/planchas/plancha-de-acero.html> (ok) [Accessed 26 Jun. 2016].
- Diotronic. (2016). [online] Available at: <http://www.diotronic.com/productes.aspx?t=kit> [Accessed 26 Jun. 2016].

## **Anexo A. Planos Mecanismo (diseño 1 y 2)**

En este anexo se encuentran los planos del primer diseño y del rediseño o diseño 2. La carpeta '*Anexos A. Planos Mecanismo (diseño 1 y 2)*' está adjunta en la entrega dentro de la carpeta:

*ANEXOS\_120372\_DISEÑO DE UN SIMULADOR PASIVO DE PULMÓN PARA UN RESPIRADOR MECÁNICO*

## **Anexo B. Hojas de procesos Mecanismo (diseño 1 y 2)**

En este anexo se encuentran las hojas de procesos del primer diseño y del rediseño o diseño 2. La carpeta '*Anexos B. Hojas de procesos Mecanismo (diseño 1 y 2)*' está adjunta en la entrega dentro de la carpeta:

*ANEXOS\_120372\_DISEÑO DE UN SIMULADOR PASIVO DE PULMÓN PARA UN RESPIRADOR MECÁNICO*

## **Anexo C. Planos Válvula**

En este anexo se encuentran los planos de la válvula lineal. La carpeta '*Anexos C. Planos Válvula*' está adjunta en la entrega dentro de la carpeta:

*ANEXOS\_120372\_DISEÑO DE UN SIMULADOR PASIVO DE PULMÓN PARA UN RESPIRADOR MECÁNICO*

## **Anexo D. Hojas de procesos Válvula**

En este anexo se encuentran las hojas de procesos de la válvula. La carpeta '*Anexos D. Hojas de procesos Válvula*' está adjunta en la entrega dentro de la carpeta:

*ANEXOS\_120372\_DISEÑO DE UN SIMULADOR PASIVO DE PULMÓN PARA UN RESPIRADOR MECÁNICO*